ELEKTRONENOPTISCHER MASKIERUNGS-PROJEKTOR MIT 1 : 1 - ABBILDUNG

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Friedrich Martin
aus Leonberg

1980

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548921_0032

ELEKTRONENOPTISCHER MASKIERUNGS-PROJEKTOR MIT 1 : 1 - ABBILDUNG

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Friedrich Martin
aus Leonberg

1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 1980

Dekan: Prof. Dr. W. Prandl

Erster Berichterstatter: Prof. Dr. R. Speidel

Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr. G. Möllenstedt

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (07472) 22145

INHALTSVERZEICHNIS Seite

1.	Einleitung	1
2.	Aufbau des Maskierungsprojektors	4
3.	Abbildungsbedingungen	7
4.	Magnetfeld	9
4.1.	Justierung des Magnetfeldes	10
5.	Elektrisches Feld	13
6.	Elektronenstrahlerzeugung und Registrierung	15
7.	Einfluß der rückgestreuten Elektronen	18
7.1.	Proximity- Effect	18
7.2.	Wieder auftreffende Rückstreuelektronen	19
8.	Abbildungsergebnisse	21
9.	Verzeichnung	29
9.1.	Radiale Verzeichnung	30
9.2.	Bilddrehung	31
9.3.	Ergebnisse der Verzeichnungsmessung	32
9.4.	Korrektur der Verzeichnung	33
9.5.	Waferverzug	36
10.	Abbildung durch Netzanode	38
11.	Ablenkung des Bildfeldes	41
12.	Zusammenfassung	44
13.	Literatur	47
	Anhang	A1

1. EINLEITUNG

Die fortschreitende Entwicklung immer höher integrierter Bauelemente führt in der Halbleitertechnologie inzwischen zu Schaltkreisen, bei denen auf einer etwa 2,5 x 3 mm^2 großen Fläche einige zehntausend Transistorfunktionen untergebracht werden. Diese Schaltkreise werden auf einer Siliziumscheibe (Wafer) mit einem Durchmesser von 50 mm bis 100 mm hergestellt. Die hierfür notwendigen Ätz- und Diffusionsmasken weisen Abmessungen bis herunter zu 1 µm auf.

Die zur Übertragung dieser Masken bisher eingesetzten lichtoptischen Kontaktkopiergeräte sind hier an einer Grenze angelangt. Zur Vermeidung von Beugungserscheinungen müssen Maske und Wafer sehr eng zusammengebracht werden, wodurch die Maske bald mechanisch beschädigt wird. Deshalb müssen diese Masken nach 5 bis 10 Belichtungen ausgetauscht werden. Da die Herstellung der Masken nicht billig ist, führt ihre kurze Lebensdauer zu einer erheblichen Erhöhung der Produktionskosten in der Halbleiterindustrie.

Bei der bisher üblichen Technologie mit Abmessungen bis 2,5 µm werden überwiegend nasschemische Ätzverfahren angewandt. Als Ätzschutzmaske sind Photolacke mit etwa 0,3 µm Dicke ausreichend. Wegen der hierbei auftretenden Unterätzung sind Nassätzungen in der 1 µm- Technologie nicht mehr anwendbar.

Die neu entwickelten reaktiven Ionenätzverfahren erfordern Lackdicken von über 1 µm. Diese Lackdicken können in lichtoptischen Kontaktkopiergeräten nicht mehr einwandfrei verarbeitet werden, da durch Beugung und Ausbildung von stehenden Wellen Abbildungsfehler entstehen.

Deshalb werden elektronenoptische Abbildungsysteme entwickelt, bei denen diese Probleme der lichtoptischen Verfahren nicht auftreten.

Der Mikroschreiber arbeitet mit einer feinen Elektronenstrahlsonde, die rasterförmig über die zu maskierende Fläche geführt wird. Durch hell- dunkel- Tastung des Elektronenstrahls wird in einem elektronenempfindlichen Lack die Maske geschrieben. Auf Grund des begrenzten Ablenkwinkels können nur Felder in der Größe eines Schaltkreises (Chip) von etwa 2,5 x 3 mm^2 beschrieben werden. Die vollständige Maskierung eines ganzen Wafers erfolgt daher sequenziell im "Step and Repeat"- Verfahren.

Der Vorteil des Mikroschreibers besteht in seiner großen Flexibilität (es ist hier möglich einzelne Schaltkreise nach Wunsch zu ändern), und seinem hohen Auflösungsvermögen, jedoch wird die Belichtungszeit für einen ganzen Wafer mit mehreren Stunden recht hoch. Für eine Massenfertigung von Halbleiterbauelementen ist der Mikroschreiber deshalb nicht geeignet. Er wird vorwiegend zur Herstellung der Masken für Kontaktkopiergeräte und für Einzelfertigungen eingesetzt.

Bei verkleinernden Maskierungsprojektoren wird ein Bereich von Chip- Größe als Ganzes abgebildet. Die vollständige Belichtung des Wafers erfolgt wieder im "Step and Repeat"- Verfahren. Hier treten bei Verzeichnung und Stabilität der Abbildungsbedingungen besondere Schwierigkeiten auf.

Als direkten Ersatz für die lichtoptischen Kontaktkopiergeräte wurde 1969 von T. W. O'Keeffe (1) ein Verfahren nach dem Prinzip des fokussierten 1:1- Bildverstärkers vorgeschlagen.

Die abzubildende Maske wird als lichtundurchlässiges Muster auf einer Quarzglasscheibe hergestellt und mit einer Photoschicht überzogen. Diese Photokathode wird von hinten mit UV- Licht durchleuchtet. Die an den lichtdurchlässigen Stellen ausgelösten Elektronen werden durch ein homogenes elektrisches Feld auf die als Anode angebrachte Siliziumscheibe beschleunigt und durch ein homogenes, dem elektrischen Feld paralleles Magnetfeld fokussiert. Abb. 1 zeigt die Prinzipzeichnung eines solchen Projektors.

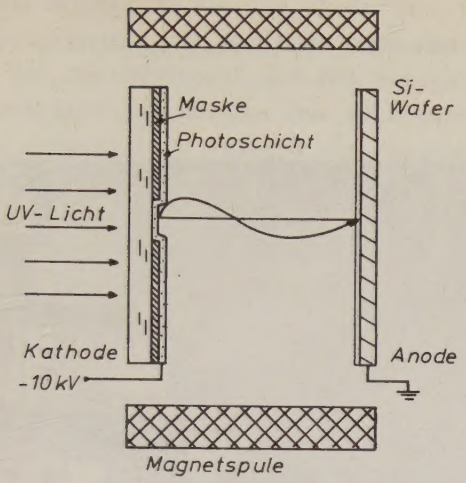


Abb. 1 Prinzipzeichnung eines Maskierungsprojektors

Nach diesem Prinzip wurden auch von J. P. Scott (2,3) und W. R. Livesey (4) Projektionssysteme aufgebaut. Zur Erzeugung des Magnetfeldes werden bei diesen Geräten eisenfreie Spulenanordnungen verwendet. Bei der notwendigen Feldstärke von etwa 800 A/cm und einer erforderlichen Homogenität von $\Delta B/B < 10^{-5}$ müssen diese Spulen recht groß gebaut werden, was auch eine große Leistungsaufnahme zur Folge hat. Eine Vergrößerung des Abbildungsbereichs über 50 mm Durchmesser hinaus ist damit nicht ohne erheblichen Mehraufwand möglich. Ein weiterer Nachteil ist, daß das Magnetfeld in einer eisenfreien Spule von magnetisierbaren Geräten in ihrer Umgebung beeinflusst wird.

Bei dem hier beschriebenen Projektionssystem wird deshalb ein Eisenjochmagnet mit Polschuhen zur Erzeugung eines stabilen Magnetfeldes eingesetzt. Dabei ist zwar der Raum zwischen den Polschuhen in Feldrichtung begrenzt (hier 78 mm), jedoch ist seitlich genügend Platz vorhanden, so daß die Elektroden für die Erzeugung eines homogenen elektrischen Feldes ausreichend groß gewählt werden können.

2. AUFBAU DES MASKIERUNGSPROJEKTORS

Den Gesamtaufbau des Maskierungsprojektors zeigt Abb. 2 .

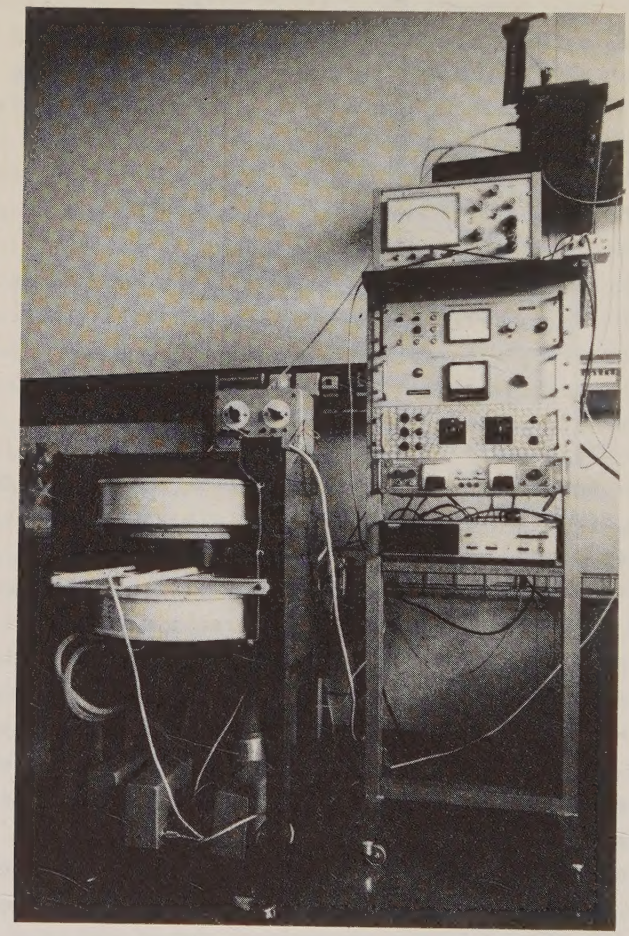


Abb. 2 Gesamtaufbau des Maskierungsprojektors

Im unteren Teil des Gestells, auf dem der Eisenjochmagnet steht, sind die drei Netzgeräte der UV- Lichtquellen unter-

gebracht. Zwischen den Polschuhen des Magneten befindet sich die Vakuumdose, in der die Elektroden für das elektrische Feld eingebaut sind. Die Dose kann zum Wechseln der Wafer oder der Photokathoden auf den Schienen aus dem Magneten herausgezogen werden. Das Reck neben dem Magneten enthält die elektrischen Anlagen zur Pumpensteuerung und Vakuummessung, das Versorgungsgerät für das Magnetfeld sowie die Messgeräte zur Überprüfung des Magnetfeldes und der Hochspannungsversorgung. Über dem Reck sind ein Hochspannungsschalter und ein Spannungsteiler zur Messung der Hochspannung aufgebaut.

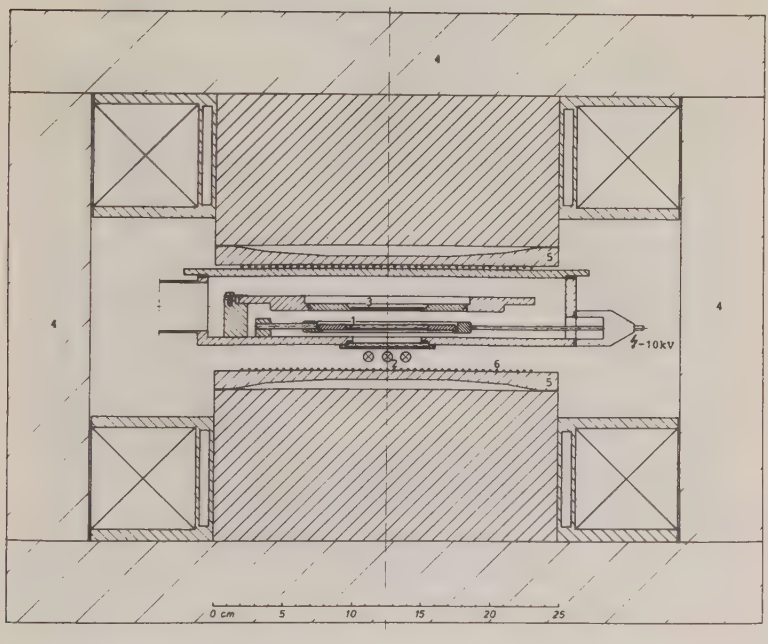


Abb. 3 Maßstabsgerechte Zeichnung des Maskierungsprojektors

Eine maßstabsgerechte Zeichnung des Maskierungsprojektors zeigt Abb. 3 . Die Photokathode (1) wird von Keramikisolatoren gehalten und durch ein Quarzglasfenster von den

UV- Lampen (2) beleuchtet. Die Si- Wafer (3), auf die die Photokathode abgebildet werden soll, liegen in einer Anodenscheibe, die zum Auswechseln der Photokathode herausgenommen werden kann. Anode und Kathode befinden sich in einer vakuumdichten Dose mit abnehmbarem Deckel zwischen den Polschuhen des Magneten (4). Korrekturplatten (5) sorgen für eine Homogenisierung des Magnetfeldes. Mit der Spulenanordnung (6) kann das Bild der Photokathode auf dem Wafer zu Justierzwecken verschoben werden.

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Anordnung der Elektroden in der Vakuumdose. Bei Abb. 5 wurde die Anode entfernt. Links unten sind die Blendenhebel zu sehen, mit denen die Lichtquellen zur Belichtungszeitsteuerung abgedeckt werden können.

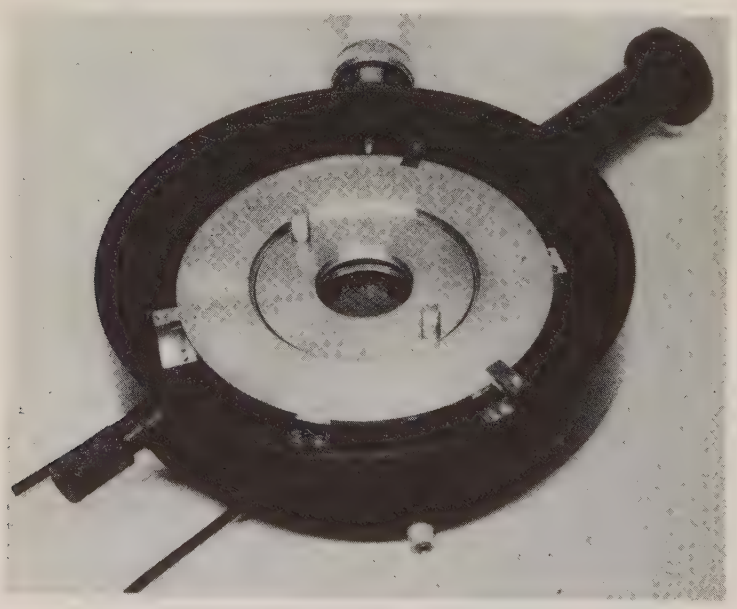


Abb. 4 Geöffnete Vakuumdose

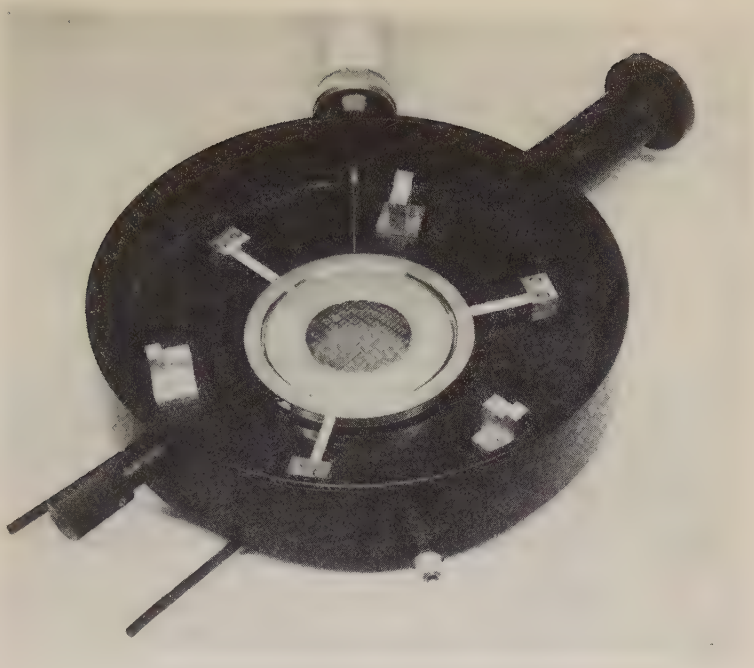


Abb. 5 Geöffnete Vakuumdose ohne Anode

3. ABBILDUNGSBEDINGUNGEN

Die an der Photokathode durch das UV- Licht ausgelösten Elektronen haben eine Anfangsenergie, die von der Differenz zwischen der Energie der Lichtquanten und der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials abhängt. Die Elektronen treten im gesamten Winkelbereich von $\pm 90^{o}$ um die Flächennormale aus. Bei Anlegen einer elektrischen Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode bewegen sich die Elektronen auf Parabelbahnen zur Anode, was nur eine sehr grobe Abbildung zulässt. Das gleichzeitig wirkende homogene Magnetfeld zwingt nun die Elektronen auf Spiralbahnen, die eine scharfe Abbildung ergeben, wenn das Magnetfeld so eingestellt wird, daß die Elektronen auf dem Weg zwischen Kathode und Anode gerade einen Umlauf im Magnetfeld durchführen. (Berechnungen hierzu befinden sich im Anhang)

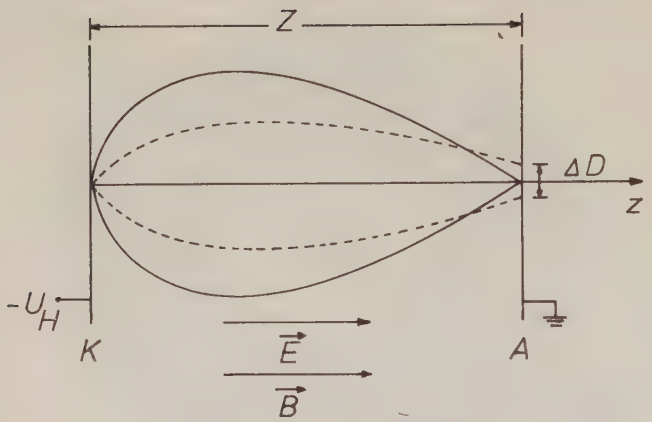


Abb. 6 Abbildungsbedingungen im Maskierungsprojektor

Der Zusammenhang zwischen Beschleunigungsspannung U, Magnetfeldstärke B und dem Abstand Z zwischen Kathode und Anode ist gegeben durch die Abbildungsgleichung

$$B = \pi\sqrt{2m/e}\sqrt{U}/Z$$

oder mit Zahlenwerten

$$B/\mathrm{Acm}^{-1} = 8{,}43\sqrt{U/V}\,Z^{-1}/\mathrm{cm}$$

Diese Gleichung gilt nur für die Elektronen, deren Anfangsgeschwindigkeit keine Komponente in der Richtung der Abbildungsfelder hat. Durch eine Anfangsgeschwindigkeit in Feldrichtung wird ein Abbildungsfehler bewirkt. Der Durchmesser ΔD dieses Fehlerscheibchens ist

$$\Delta D \leq 2Z \cdot U_o/U$$

wobei U_o der maximalen Anfangsenergie der Photoelektronen entspricht.

Als Beispiel für das erwartete Auflösungsvermögen erhält man bei dem hier untersuchten Gerät bei einer Energiebreite der Photoelektronen von 0,2 eV, Beschleunigungsspannung U = 10 kV und einem Abstand zwischen Kathode und Anode von Z = 10 mm ein Fehlerscheibchen mit $\Delta D \leq 0{,}4$ µm, wobei eine

Magnetfeldstärke von B = 843 A/cm benötigt wird.

Um dieses Auflösungsvermögen auch zu erreichen, müssen die Abbildungsfelder in ihrer Homogenität und zeitlichen Konstanz bestimmten Anforderungen genügen. Der Einfluß dieser Felder auf das Fehlerscheibchen der Abbildung ist gegeben durch die Gleichungen

$$\Delta D_U \leqslant Z\sqrt{U_o/U}\cdot\Delta U/U$$

$$\Delta D_B \leqslant 2Z\sqrt{U_o/U}\cdot\Delta B/B$$

Die zeitlichen und örtlichen Schwankungen des elektrischen Feldes dürfen somit den Wert von $\Delta U/U = 2\cdot10^{-3}$ nicht überschreiten, während das Magnetfeld mit $\Delta B/B = 1\cdot10^{-3}$ stabil sein muss, wenn der Beitrag der durch diese Felder bewirkten Fehler zum Bildfehler kleiner als 0,1 µm sein soll.

Durch unebene Oberflächen und Krümmung der Wafer entstehen Änderungen im Abstand zwischen Kathode und Anode. Die hierdurch bedingte Unschärfe beträgt

$$\Delta D_Z \leqslant 2\sqrt{U_o/U}\cdot\Delta Z$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich eine Tiefenschärfe des Abbildungssystems von $\Delta Z = \pm 11$ µm, die aber nicht ausgenützt werden kann, da Abstandsschwankungen in dieser Grössenordnung zu einer unzulässig hohen Verzeichnung führen. In Kapitel 9 wird darauf noch näher eingegangen.

4. MAGNETFELD

Zur Erzeugung eines homogenen und zeitlich stabilen Magnetfeldes wird ein Eisenjochmagnet mit Polschuhen verwendet. Durch die feste Flußführung im Außenkreis ist das Streufeld sehr gering, so daß magnetisierbare Geräte in der Umgebung keinen Einfluß auf das Abbildungsfeld haben.

Die Polschuhe wurden mit einem Durchmesser von 250 mm aus Eisen der Marke Buderus AME 12, DIN- Bezeichnung RFe 120 hergestellt. Die Spaltweite beträgt ohne Korrekturplatten 105 mm.

Das Eisenjoch aus Automatenstahl der DIN- Bezeichnung 9S20 hat die Außenabmessungen 550 mm Breite, 445 mm Höhe und 250 mm Tiefe bei einem Materialquerschnitt von 250 x 58 mm^2.

Zur Stromversorgung wird ein Netzgerät Kepko HB 250 M verwendet, dessen Ausgangsstrom mit einem Stufenschalter in Schritten von $\Delta I/I = 3 \cdot 10^{-4}$ eingestellt werden kann.

Als Maß für die zur richtigen Fokussierung notwendige Feldstärke ist der Spulenstrom nicht geeignet, da die Kennlinie des Magneten eine zu große Hysteresis aufweist. Die richtige Feldstärke wird deshalb mit Hilfe eines Magnetfeldmessgerätes eingestellt, dessen Hallsonde fest im Feld eingebaut wurde. Hierzu wird ein Oerstedtmeter H 1582 des Instituts Dr. Förster verwendet, dessen Ablesegenauigkeit mit einem Digitalvoltmeter Solartron A 220 erhöht wurde.

Die relative Genauigkeit dieser Messeinrichtung von $3 \cdot 10^{-4}$ ermöglicht es, die in einer Fokussierungsreihe ermittelte Feldstärke immer wieder einzustellen. Eine entsprechend genaue Messung der absoluten Feldstärke hängt von der Verwendung eines geeigneten Eichfeldes ab und wurde deshalb nicht durchgeführt, da ja zur Fokussierung die Einstellung des einmal ermittelten Anzeigewertes ausreicht.

4.1. JUSTIERUNG DES MAGNETFELDES

Das Feld des Polschuhmagneten ist zunächst nicht ausreichend homogen, um eine einwandfreie Abbildung zu ermöglichen. Wie die obere Kurve in Abb. 7 zeigt, erreicht das Feld in einem Bereich von 50 mm Durchmesser eine Inhomogenität von $\Delta B/B = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$. Die bei der Herstellung des Eisenjochs und der Polschuhe auftretenden Bearbeitungstoleranzen führten zu einer leichten Verkippung der Polschuhe, die eine messbare Asymmetrie des Magnetfeldes brachte.

Um das Feld homogener zu erhalten, wurden Korrekturplatten auf die Polschuhe aufgespannt, die auf der dem Polschuh zugewandten Seite mit einem Profil versehen wurden. Durch den so entstehenden Luftspalt zwischen Polschuh und Korrek-

turplatte wird das Magnetfeld entsprechend dem Profil in der Mitte stärker geschwächt, wodurch ein homogeneres Magnetfeld erzielt werden kann.

Das richtige Profil der Platten wurde durch Ausmessen des Feldes mit der Hallsonde und entsprechende weitere Korrektur des Plattenprofils ermittelt. Die untere Kurve in Abb. 7 gibt den korrigierten Feldverlauf wieder.

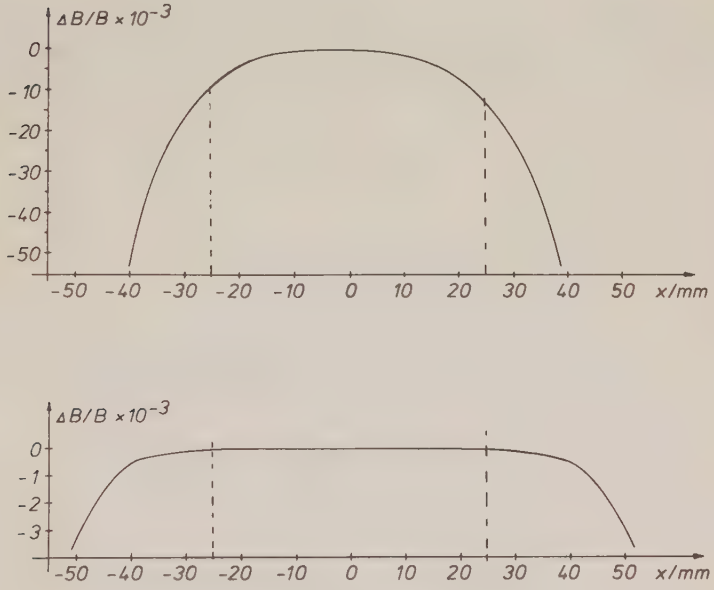
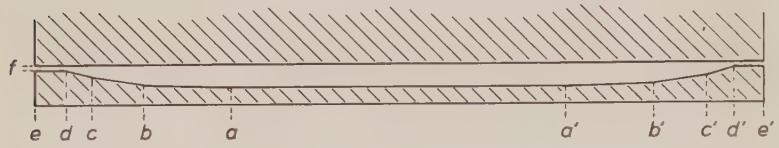


Abb. 7 Feld des Polschuhmagneten ohne (oben) und mit (unten) Korrekturplatten

Mit der vorhandenen Messeinrichtung konnte das Feld so eingestellt werden, daß in einem Bereich von 80 mm Durchmesser eine Homogenität von $\Delta B/B < 5 \cdot 10^{-4}$ erreicht wurde. In dem zur Abbildung verwendeten Bereich von 50 mm Durchmesser konnte keine Feldänderung mehr festgestellt werden. In Abb. 8 ist das Profil der Korrekturplatten angegeben.

Mit dem so korrigierten Magnetfeld konnten die vorhandenen Masken mit Durchmessern von 50 mm im ganzen Bildfeld scharf übertragen werden, wie Verzeichnungsmessungen ergaben, reicht diese Feldjustierung jedoch noch nicht aus, um verzeichnungsfreie Maskierungen zu erhalten. In Kapitel 9 wird darauf nochmals eingegangen.



Korrekturprofil	a-a'	b-b'	c-c'	d-d'	e-e'
Durchmesser/mm	115	175	211	230	250
Dicke der Platte/mm	6,3	7,3	9,5	12,5	12,5

Abstand der Platte vom Polschuh: f = 1mm

Abb. 8 Profil der Korrekturplatten

Zusammenstellung der Daten des Polschuhmagneten

Abmessungen:	Höhe	445 mm
	Breite	550 mm
	Tiefe	420 mm
Freier Raum zwischen den Polschuhen		
	Höhe	78 mm
	Breite	430 mm
Magnetspulen:	Drahtstärke	0,9 mm
	Gesamtwindungszahl	10380
	Gesamtwiderstand	310 Ohm
Leistungsaufnahme für ein Magnetfeld von 910 A/cm		200 Watt
Homogenität bei einem Felddurchmesser von 80 mm		$\Delta B/B < 5 \cdot 10^{-4}$

5. ELEKTRISCHES FELD

Bei der Herstellung der Elektroden und der Vakuumdose muß beachtet werden, daß unmagnetisierbares Material verwendet wird. Der zuerst eingesetzte als unmagnetisierbar bezeichnete Stahl der DIN- Bezeichnung X5Cr Ni 18 9 bewirkte eine unzulässig hohe Verzerrung des Magnetfeldes in der Größenordnung von etwa 0,5 % der Sollfeldstärke.

Deshalb wurde Messing verwendet, das vor der Bearbeitung im Magnetfeld überprüft wurde. Dabei ergab sich, daß auch Messing häufig durch magnetisierbare Metalle so stark verunreinigt ist, daß es im Maskierungsprojektor nicht verwendet werden kann.

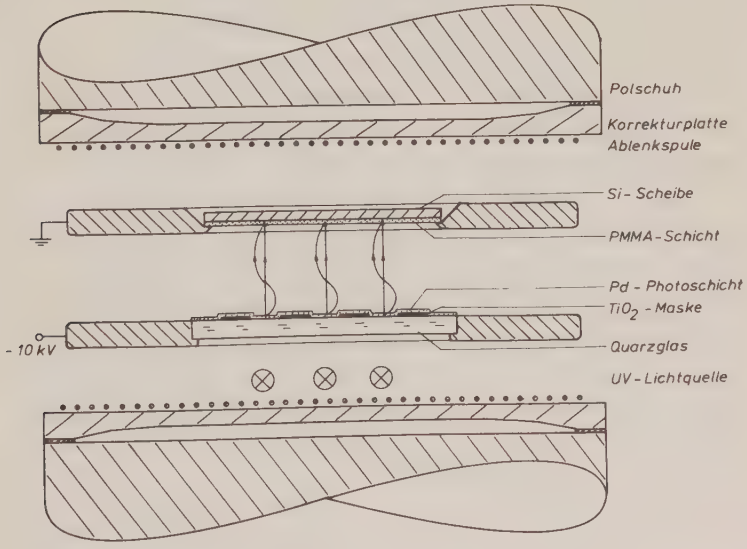


Abb. 9 Prinzipaufbau des Maskierungsprojektors

Als Maskenträger werden Quarzglasscheiben mit 60 mm Durchmesser und 3 mm Dicke verwendet, die in eine Messingscheibe mit 100 mm Durchmesser so eingelegt werden, daß am Übergang

von Glas und Messingscheibe keine das elektrische Feld verzerrende Stufe entsteht. Diese Kathode liegt in einem Ring von 121 mm Durchmesser, der mit Keramikisolatoren in der Dose befestigt ist, und an dem auch die Hochspannungszuführung angeschlossen ist. (Abb. 3 und 9)

Die Si- Scheiben, auf die das Muster der Photokathode abgebildet werden soll, liegen als Anode in einer Messingscheibe von 110 mm Durchmesser im Abstand von 10 mm über der Kathode. Dieses Bauteil ist in einen mit dem Gehäuse leitend verbundenen Ring eingesetzt und kann so leicht herausgenommen werden, wenn eine neue Kathode eingesetzt werden soll. (Abb, 3 und 9)

Da die Si- Scheiben von oben in die Messinganode eingelegt werden, lässt sich hier eine Auflagelippe nicht vermeiden. Die dadurch entstehende Verbiegung des elektrischen Feldes ergibt eine erhebliche Verzeichnung der Abbildung, auf die in Kapitel 9 noch näher eingegangen wird.

Als Spannungsversorgung wird eine geregelte Hochspannungsquelle Zeiss HA 60 RE verwendet. Nach einer Einlaufzeit mit eingeschalteter Hochspannung von etwa einer Stunde geht die Drift auf weniger als $\Delta U/U = 10^{-3}$ pro Stunde zurück. Um diese Stabilität auch ausnutzen zu können, wurde zwischen Spannungsquelle und Abbildungssystem ein hochspannungsfester Schalter eingebaut. Die Spannungsquelle kann so eingeschaltet bleiben, auch wenn zum Wechseln der Wafer das Abbildungssystem belüftet wird.

Die genaue Einstellung der Spannung wird mit dem über einen Spannungsteiler angeschlossenen Digitalvoltmeter überprüft.

6. ELEKTRONENSTRAHLERZEUGUNG UND REGISTRIERUNG

Das Auflösungsvermögen des Maskierungsprojektors wird mit bestimmt durch Apertur und Energiebreite der aus der Photoschicht ausgelösten Elektronen. Photoschicht und Lichtquelle müssen daher passend ausgewählt werden, damit die Energiebreite klein bleibt.

Die Photoschicht sollte außerdem an Luft stabil bleiben, da das Abbildungssystem zu jedem Wechsel der Wafer belüftet wird. Auch können dann weitere betriebsbereite Photokathoden als Vorrat bereit gehalten werden.

Aus diesen Gründen wurde Palladium als Photoschicht in Verbindung mit Quecksilberniederdruckbrennern verwendet. Die eingesetzten Stablampen der Firma Hanau Quarzlampen GmbH vom Typ NK 6/12 haben ein ausgeprägtes Linienspektrum. Etwa 87% der emittierten Lichtenergie werden in der Linie mit 154 nm Wellenlänge entsprechend 4,89 eV ausgestrahlt.

Die Austrittsarbeit des Palladium liegt je nach Oberflächenbeschaffenheit zwischen 4,7 eV und 4,9 eV, so daß zu erwarten ist, daß die Energiebreite der Photoelektronen ausreichend klein bleibt. Das Palladium wird in einer Schichtdicke von 4 nm verwendet.

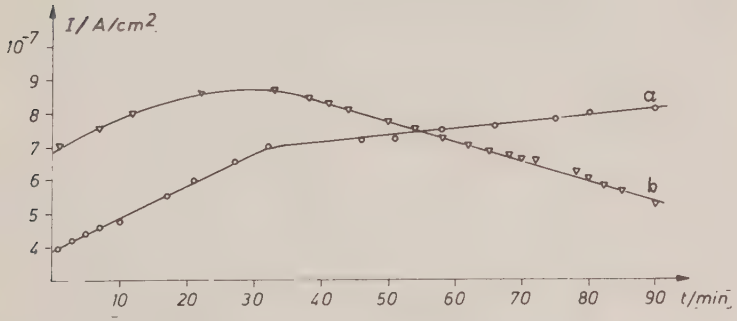


Abb. 10 Zeitabhängigkeit des Photostromes.
a: saubere Anode, b: mit PMMA beschichtete Anode

Die Zeitabhängigkeit des Elektronenstroms ist in Abb. 10 angegeben. Kurve a wurde mit einer sauberen Messingscheibe als Anode aufgenommen, während für Kurve b eine mit einer elektronenempfindlichen Schicht versehene Si- Scheibe eingelegt wurde. Der anfängliche Anstieg des Stromes lässt sich aus dem Einbrennverhalten der UV- Lichtquellen erklären. Während bei sauberer Anode der Elektronenstrom nach einiger Zeit stabil bleibt, nimmt er bei beschichteter Anode wieder ab. Der Grund hierfür ist das Aufwachsen einer Kontaminationsschicht auf die Photokathode, die hauptsächlich aus Molekülbruchstücken besteht, die aus der Beschichtung der Si- Scheiben herausgeschlagen wurden. Durch diese Verunreinigung wird die Lebensdauer der Photoschicht begrenzt. Nach etwa 40 bis 50 Belichtungen muß sie erneuert werden.

Die abzubildende Maske muß als lichtabsorbierendes Muster unter der Photoschicht vorhanden sein. Diese Maskenstruktur wird als 70 nm dicke Titanschicht im "Lift-off"-Verfahren auf der Quarzglasscheibe hergestellt und anschliessend bei etwa 450°C zu TiO_2 durchoxydiert. TiO_2 weist eine sehr hohe Absorption für das zur elektronenauslösung verwendete UV- Licht auf. Abb. 11 zeigt das Absorptionsverhalten einer 100 nm dicken Schicht auf Quarzglas.

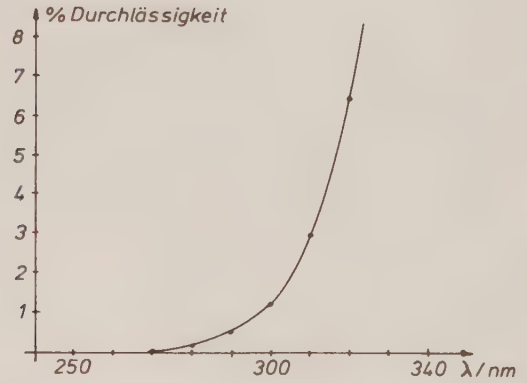


Abb. 11 Lichtdurchlässigkeit einer 100 nm dicken TiO_2- Schicht.

Die so hergestellten Masken haften sehr gut auf der Quarzglasoberfläche und sind gegen mechanische und chemische Einwirkungen unempfindlich. Die darüber liegende Photoschicht kann leicht in HNO_3 abgelöst werden, wobei die Maskenstruktur selbst nicht verändert wird. Nach erneutem Bedampfen der Maske mit Palladium kann die Photokathode wieder verwendet werden.

Als elektronenempfindliche Beschichtung der Si- Scheiben wird Polymethylmethacrylat (PMMA) verwendet. Durch Aufschleudern wurden Schichten zwischen 0,3 µm und 1,6 µm Dicke hergestellt. Da PMMA ein Isolator ist, müssen die Si- Scheiben im Maskierungsprojektor von hinten kontaktiert werden.

Wenn die Dicke der PMMA- Schicht zu groß wird, bleibt ein Teil der Elektronen bei der Belichtung in der isolierenden Schicht stecken, wodurch lokale Aufladungen entstehen, die eine scharfe Abbildung verhindern. Bei einer Beschleunigungsspannung von 12 kV konnten aber noch Lackdicken von 1,6 µm sauber belichtet werden. Bei Lackdicken von unter 0,5 µm konnte auch mit einer Beschleunigungsspannung von 5 kV eine scharfe Abbildung erreicht werden.

Die Belichtungszeit beträgt bei einer PMMA- Schicht von 0,4 µm Dicke und einer Beschleunigungsspannung von 10 kV 20 sec, bei einer Schichtdicke von 1,6 µm und einer Spannung von 12 kV werden 40 sec für die Belichtung benötigt.

Damit ist man in der Lage einen ganzen Wafer mit etwa 120 Chips in einer Zeit von 20 bis 40 Sekunden zu belichten.

7. EINFLUSS DER RÜCKGESTREUTEN ELEKTRONEN

7.1. PROXIMITY- EFFECT

An der Si- Scheibe rückgestreute Elektronen liefern einen zusätzlichen Beitrag zur Belichtungsdosis eines Bildpunktes. Da der in einem Bildpunkt auftreffende Elektronenstrahl in der Si- Scheibe durch Streuung aufgeweitet wird, treten die reflektierten Elektronen in einer Umgebung von mehreren µm Durchmesser um den Bildpunkt aus.

Diese Erscheinung bewirkt, daß die Belichtungsdosis eines Bildpunktes von seiner näheren Umgebung abhängt (Proximity-Effect). Nach dem von T. H. P. Chang (11) angegebenen Reziprozitätsprinzip ist die Belichtungsdosis, die der Punkt P_1 durch rückgestreute Elektronen von der belichteten Fläche A erhält, gleich der Dosis, die ein im Punkt P_1 auftreffender Elektronenstrahl in der Fläche A erzeugt (Abb. 12).

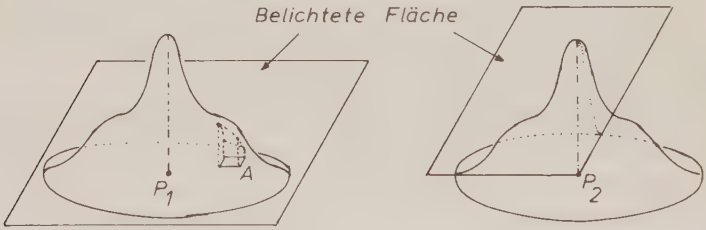


Abb. 12 Durch den Proximity- Effect entstehende Belichtungsdosis verschieden angeordneter Bildpunkte.

Die gesamte Belichtungsdosis, die ein Bildpunkt durch den Proximity- Effect aus seiner belichteten Umgebung erhält, lässt sich somit ermitteln, indem die zu diesem Bildpunkt gehörende Streuverteilung aufgetragen wird und die Dosisbeiträge der unter dieser Verteilung liegenden belichteten Flächen aufsummiert werden. Der Bildpunkt P_2 in der Ecke einer größeren belichteten Fläche erhält somit nur ein Viertel der Zusatzbelichtung, die der Punkt P_1 im Innern

der Fläche erhält. Entsprechend ist die durch den Proximity-Effect bewirkte Belichtung einer einzeln stehenden, schmalen belichteten Linie gering, während ein schmaler Steg zwischen belichteten Flächen von beiden Seiten durch Rückstreuelektronen belichtet wird. Diese von der Umgebung abhängige Belichtung führt zu charakteristischen Veränderungen der abgebildeten Maskenstrukturen.

Bei der Maskierung mit Elektronenstrahlschreibern kann der Einfluß des Proximity- Effects verringert werden, wenn die Steuerung des Schreibstrahls der erforderlichen Belichtungsdosis der Maske angepasst wird.

Die großflächige Belichtung des Maskierungsprojektors lässt diese einfache Möglichkeit nicht zu. Hier kann durch entsprechende Anpassung der Maskenabmessungen wieder die gewünschte Linienbreite des Bildes erhalten werden. Eine Korrektur der verrundeten Ecken würde aber gebogene Maskenstrukturen erfordern, was die Herstellung der Masken erheblich erschwert.

Eine andere Korrekturmöglichkeit besteht in der Verwendung von Zweitonmasken. Hier werden die Maskenteile, die eine zu hohe Belichtungsdosis im Bild ergeben würden, bei der Herstellung der Photokathode in einem weiteren Arbeitsgang mit einer lichtabsorbierenden Schicht versehen.

7.2. WIEDER AUFTREFFENDE ELEKTRONEN

Beim elektronenoptischen 1:1- Maskierungsprojektor tritt noch eine weitere Einwirkung durch rückgestreute Elektronen auf, da auch diese Elektronen durch die elektrischen und magnetischen Felder zwischen den Elektroden wieder auf die Si- Oberfläche zurückbeschleunigt werden und eine weitere Belichtung der PMMA- Schicht ergeben.

Der Abstand r in dem die Elektronen wieder auf die Si-Scheibe auftreffen, hängt vom Austrittswinkel α gegen die Flächennormale und der Geschwindigkeit v_r, mit der die Elektronen die Si- Oberfläche verlassen, ab nach der Gleichung

$$r = (2Z/\pi)\cdot(v_r/v_A)(\sin\alpha)\sin\{2\pi(v_r/v_A)\cos\alpha\}$$

wobei Z der Abstand zwischen Kathode und Anode, und v_A die Geschwindigkeit der Primärelektronen beim Auftreffen auf die Si- Scheibe ist. (Berechnung im Anhang)

Für $\alpha = 0^o$ kehren die rückgestreuten Elektronen wieder zum Ausgangsort zurück, für $\alpha = 90^o$ wird ebenfalls $r = 0$, da diese Elektronen keine freie Flugbahn durchführen können. Bei allen Austrittsgeschwindigkeiten, für die $v_r/v_A > 1/2$ ist, tritt noch eine weitere Nullstelle auf, da alle Elektronen, für die $v_r/v_A\cos\alpha = 1/2$ ist, eine volle Umlaufbahn im Magnetfeld beschreiben und somit wieder am Ausgangsort auftreffen.

Die Maxima des Abstands betragen bei Elektronen, die ohne Energieverlust reflektiert werden bei dem hier untersuchten Gerät mit Z = 10 mm

$r_1 = 4{,}4$ mm bei $\alpha = 44{,}5^o$

$r_2 = 6{,}2$ mm bei $\alpha = 75{,}9^o$

Die dritte Nullstelle tritt bei $\alpha = 60^o$ auf.

Der Beitrag, den diese wieder auftreffenden reflektierten Elektronen zur Belichtungsdosis eines Bildpunktes liefern, hängt damit vom Bedeckungsgrad der Maske in einer Umgebung von mehreren mm um den Bildpunkt ab. Bei der Annahme eines Rückstreukoeffizienten von 20% für Silizium und einer zu 50% transparenten Maske beträgt diese Zusatzbelichtung 10% der Belichtung durch die Primärelektronen. Dieser Wert kann noch erhöht werden, da Elektronen auch mehrfach reflektiert werden können.

8. ABBILDUNGSERGEBNISSE

Die Überlagerung von Abbildungsfehler, Proximity- Effect und Belichtung durch wiederauftreffende reflektierte Elektronen führt zu einer deutlichen Veränderung der Bildabmessungen bei der elektronenoptischen Abbildung. Die Abb. 13, 14 und 15 zeigen dies am Beispiel eines Testmusters.

Für die Herstellung des Testmusters konnten wegen der Abmessungen von unter 0,5 µm keine lichtoptischen Abbildungssysteme verwendet werden. Deshalb wurde das folgende Verfahren angewandt.

Das Testmuster wurde auf eine Folie aufgezeichnet und mit Hilfe eines von J. Greschner (12) entwickelten Faksimile- Elektronenstrahlmikroschreibers direkt auf eine mit einer etwa 100 nm dicken Chromschicht und der PMMA- Registrierschicht versehenen Quarzglasscheibe übertragen. Diese Belichtungen wurden freundlicherweise von G. Kilger, der zu dieser Zeit an dem Mikroschreiber arbeitete, durchgeführt.

Nach der Entwicklung wurde die freiliegende Chromschicht heraus geätzt und eine 70 nm dicke Titanschicht aufgedampft. Die nicht belichtete PMMA- Schicht und die darüberliegende Titanschicht wurden in Aceton abgelöst (Lift- off- Verfahren), wobei die in den belichteten Flächen aufgewachsene Titanschicht haften bleibt. Anschließend wurde das unter den nicht belichteten Maskenteilen stehen gebliebene Chrom weggeätzt. Nach der Oxydation der Titanschicht zu TiO_2 war die Maske für den Einsatz im Maskierungsprojektor fertig. Mit diesem Verfahren konnten Maskenstrukturen von unter 0,2 µm erhalten werden.

Im Hinblick auf den Einfluß der wiederauftreffenden reflektierten Elektronen stellt dieses Testmuster den ungünstigsten Fall dar, da es als Muster mit 126 µm x 108 µm Fläche und einem Bedeckungsgrad von unter 50% im Musterbereich auf einer belichteten Fläche von 18 mm Durchmesser liegt.

Abb. 13 zeigt das ganze Testmuster. Im oberen Bild ist

die Maske mit den TiO_2- Stegen zu sehen. Das untere Bild enthält die entsprechenden herausentwickelten PMMA- Stege auf einer Siliziumscheibe.

Die Abb. 14 und 15 zeigen oben Ausschnitte aus dem Testmuster mit der helleren TiO_2- Maske, und die entsprechenden Ausschnitte aus in PMMA belichteten Aufnahmen in den darunterliegenden Bildern.

Für die mittleren Aufnahmen der Abb. 14 und 15 und für die Belichtung der Abb. 13 wurde die Belichtungsdosis so eingestellt, daß größere belichtete Flächen (die Umgebung des Testmusters) gerade sauber entwickelt werden konnten.

Bei Spaltweiten von über 0,9 µm werden Linienpakete noch richtig abgebildet. Bei Spalten von unter 0,4 µm Breite nimmt die Belichtungsdosis so weit ab, daß sie nicht mehr vollständig entwickelt werden können.

Die Stege werden mit verringerter Breite abgebildet, je schmaler die Stege auf der Maske sind, desto stärker ist auch die Abnahme der Breite: ein Steg mit 0,9 µm Breite nimmt um etwa 0,2 µm ab, während ein Steg mit 0,7 µm Breite bei der Abbildung um etwa 0,3 µm schmaler wird (Abb. 14 und 15 Mitte). Wenn die Stegbreite auf der Maske unter 0,5 µm beträgt, kann keine saubere Abbildung mehr erreicht werden.

Wird die Belichtungsdosis erhöht, können auch Spalte, die im Original unter 0,4 µm breit sind noch entwickelt werden. Dies ist auf den unteren Aufnahmen der Abb. 14 und 15 zu sehen. Es können jetzt Spaltweiten von 0,3 µm in der Abbildung erhalten werden, die Verrundung der Ecken nimmt aber deutlich zu. Die Stege werden dabei auch um bis zu 0,5 µm schmaler als auf der Maske.

Die mit diesem Testmuster hergestellten Aufnahmen zeigen, daß eine Abbildung von Masken mit Abmessungen von über 2 µm problemlos erfolgen kann. Wenn die Maske Bildelemente mit Abmessungen von unter 1 µm enthalten soll, müssen diese gezeigten Veränderungen der Abbildung bei der Herstellung der Masken berücksichtigt werden, auch muß die richtige Belichtungsdosis genauer eingehalten werden. Bei Beachtung dieser

Gegebenheiten ist es aber möglich, Spalte mit 0,3 µm Breite und Stege mit 0,4 µm Breite mit dem elektronenoptischen Maskierungsprojektor auf die Wafer zu übertragen.

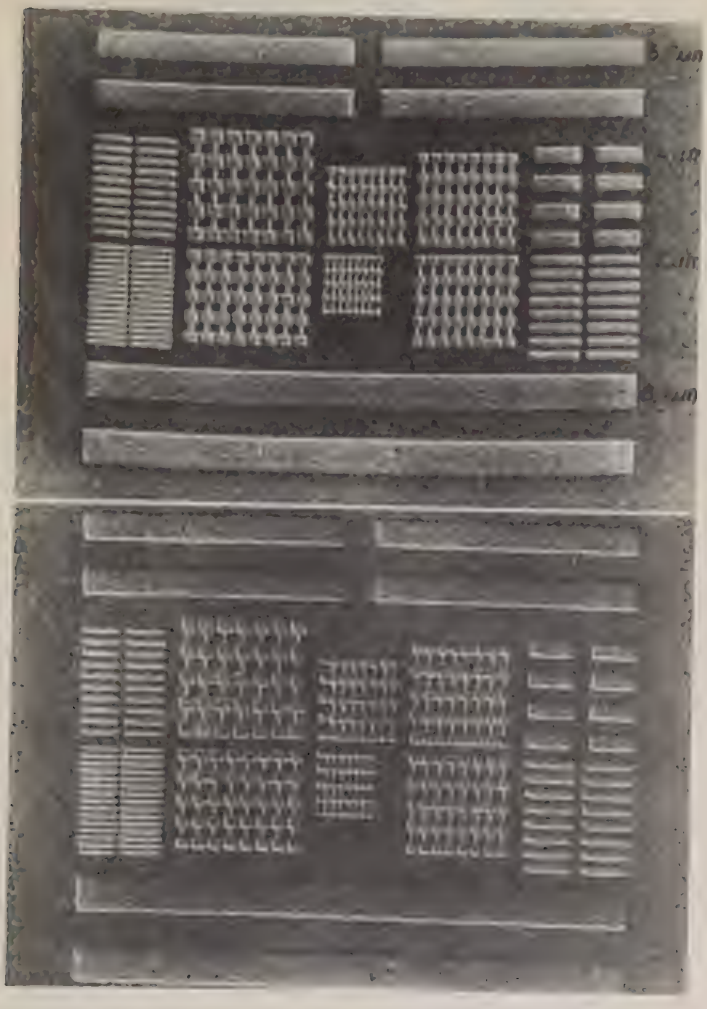


Abb. 13 Testmuster, oben: Quarzglasscheibe mit TiO_2-Maske Unten: Si- Scheibe mit Bild
Dicke der PMMA- Schicht: 0,4 µm

Abb. 14 Ausschnitt des Testmusters.
Die Belichtungsdosis ist im unteren Bild erhöht.

Massangaben in µm

Abb. 15 Ausschnitt des Testmusters.
Wiedergabe der feineren Linien bei verschiedener Belichtungsdosis.

Beispiele aus der Belichtung einer Si- Scheibe mit einer Leiterbahnenmaske mit Abmessungen bis zu 2,5 µm Breite zeigen die drei folgenden Abbildungen. Abb. 16 zeigt einen ganzen belichteten Wafer von 51 mm Durchmesser mit etwa 120 Chips. Abb. 17 zeigt einen entsprechenden Ausschnitt aus Maske und Bild. Zwei weitere Ausschnitte aus dieser Belichtung sind in Abb. 18 zu sehen. Die Dicke der PMMA-Schicht beträgt bei diesen Aufnahmen 1,6 µm. Lackdicken in dieser Größenordnung sind in lichtoptischen Kontaktkopiergeräten nicht mehr so einfach zu verarbeiten, da durch das Auftreten von stehenden Lichtwellen im Lack die Belichtung ungleichmässig werden kann.

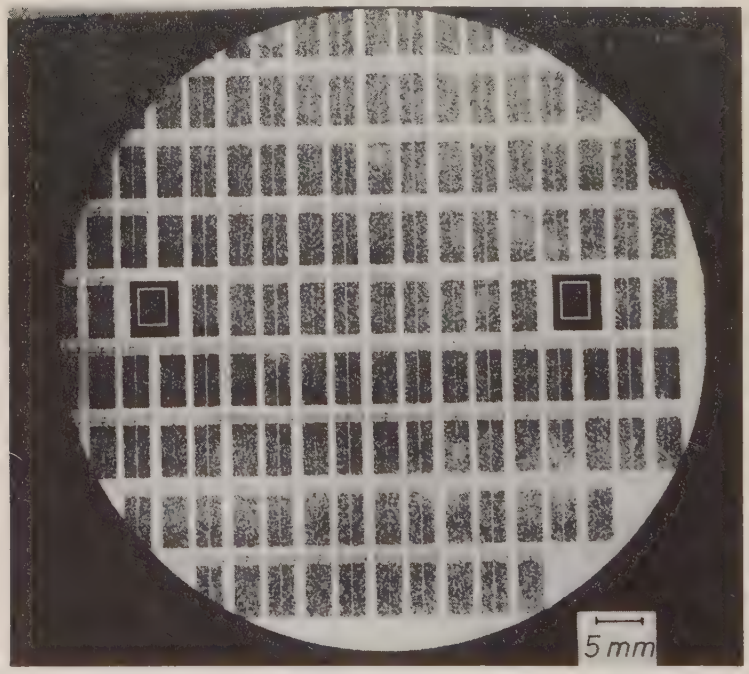


Abb. 16 Ganzer belichteter Wafer mit 51 mm Durchmesser.

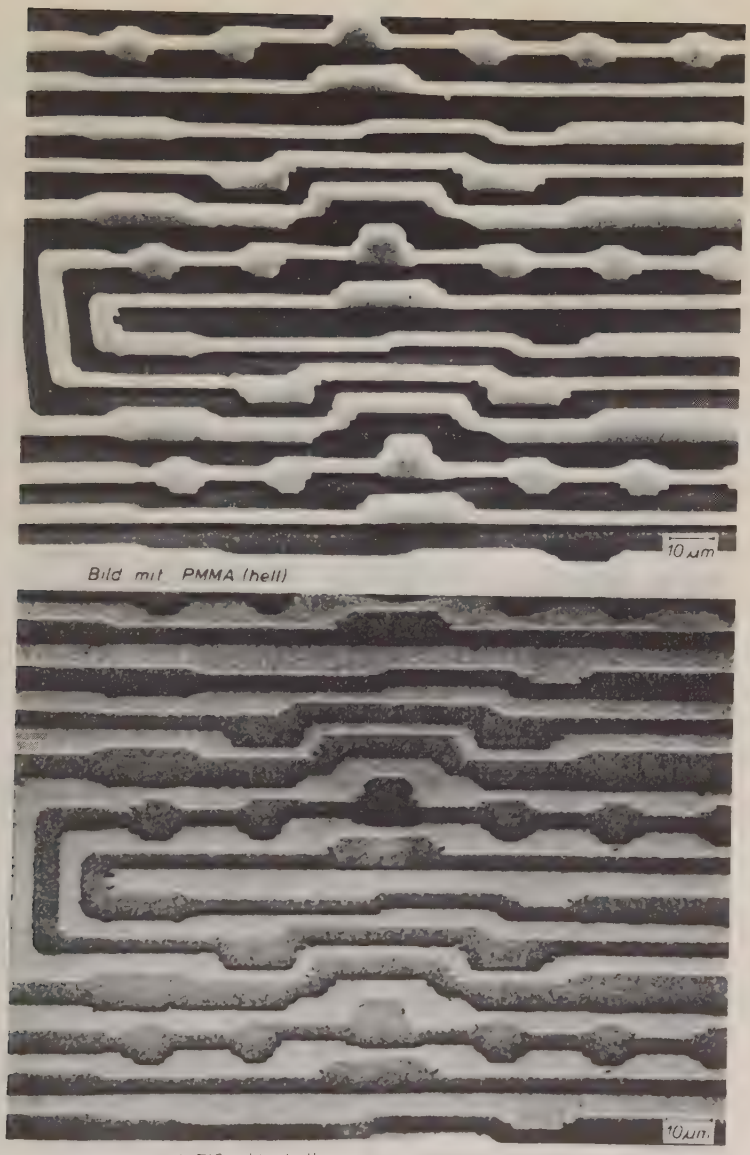


Abb. 17 Ausschnitt aus der Leiterbahnenmaske

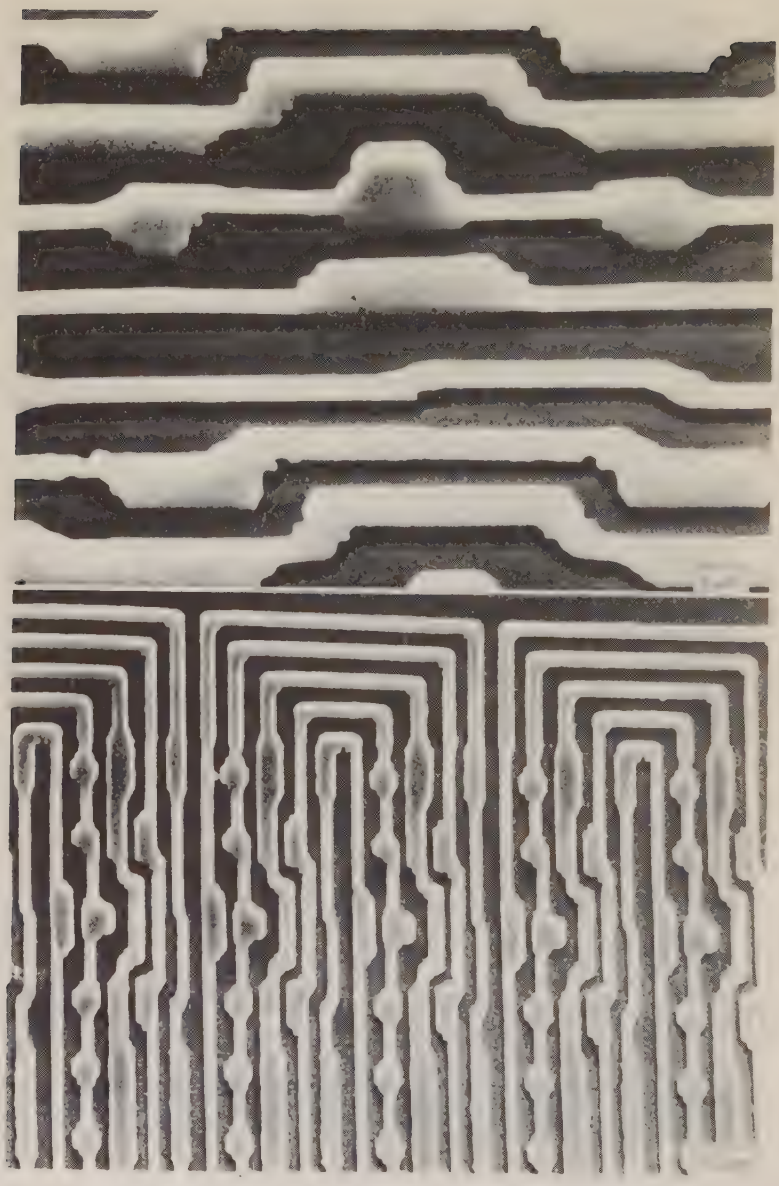


Abb. 18 Ausschnitte des mit einer Leiterbahnenmaske belichteten Wafers.

9. VERZEICHNUNG

Die zu belichtenden Wafer werden im Abbildungssystem auf eine Auflagelippe gelegt. Der Abstand zwischen Kathode und Waferoberfläche, der in die Fokusbedingung eingeht, wird so unabhängig von der Dicke der Scheiben. Auch keilförmige Waferquerschnitte haben damit keinen Einfluß auf die Abbildungseigenschaften des Projektors. Da die Scheiben hier auf der isolierenden PMMA- Schicht aufliegen, wird die Rückseite der Wafer leitend mit der Anode verbunden.

Die Auflagelippe bewirkt aber als Stufe in der Anodenoberfläche eine Verbiegung des elektrischen Feldes in ihrer Umgebung, die zu verzeichneten Bildern führt. Die Auflagelippe sollte deshalb möglichst dünn sein, jedoch ließ sie sich nicht unter 0,2 mm Dicke mit ausreichender Stabilität herstellen.

Die durch Feldverbiegungen bewirkte Verzeichnung setzt sich zusammen aus einer Veränderung des Abbildungsmaßstabs, der radialen Verzeichnung, und der Bilddrehung. Da diese Verzeichnungen auch durch lokale Feldverzerrungen entstehen können, kann die Verzeichnung des 1:1- Maskierungsprojektors nicht in der Form von Verzeichnungskoeffizienten angegeben werden, wie dies bei achsenbezogenen Abbildungssystemen üblich ist.

Deshalb wird die Verzeichnung als Verschiebung eines Bildpunktes von der Sollstelle angegeben. Eine Verschiebung Δx bezeichnet hier die Folge der radialen Verzeichnung, während die Verschiebung Δy als Folge der Bilddrehung auftritt. (Siehe Abb. 19)

Diese Verzeichnungen wurden mit Hilfe von zwei Gittermasken genauer untersucht.

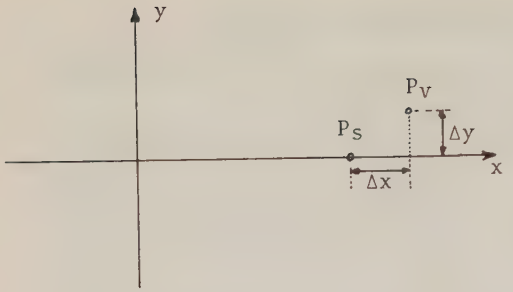


Abb. 19 Richtung der Verzeichnung.
P_S: Sollstelle des Bildpunktes
P_V: Verzeichneter Bildpunkt

9.1. RADIALE VERZEICHNUNG

Die Bildpunktversetzung Δx, die als Folge der radialen Verzeichnung auftritt, wurde mit Hilfe einer Gittermaske mit 10 µm Gitterkonstanten und 45 x 10 mm^2 Fläche gemessen. Die Gitterstege verlaufen senkrecht zur Längsseite, also senkrecht zur x- Richtung. Diese Gittermaske wurde mit dem Maskierungsprojektor abgebildet. Wenn Maske und Bild aufeinander gelegt werden, entsteht bei leichter Drehung der beiden Gitter gegeneinander ein Moirée- Muster, das bei nicht verzeichnetem Bild aus senkrecht zu den Gitterstegen verlaufenden Geraden besteht.

Wenn das Bild verzeichnet ist, wird die Gitterkonstante des Bildes im Verzeichnungsbereich verändert. Die Moirée-Linien weichen damit auch von der Geraden ab. Eine Änderung des Abstands der Moirée- Linien tritt ebenfalls auf, jedoch ist dies weniger deutlich zu sehen.

Die Abweichung Δx der Gitterstege des Bildes von der Sollstelle lässt sich aus der Gitterkonstanten g des Maskengitters , dem Abstand a der Moirée- Linien und der Abweichung Δa der Moirée- Linien von der Geraden bestimmen nach der Gleichung $\Delta x = g(\Delta a/a)$.

Die Bildpunktverschiebung Δx konnte außer durch die Verbiegung der Moirée- Linien auch mit Hilfe eines lichtoptischen Kontaktkopiergerätes genauer bestimmt werden. Hierzu wurden Maske und Bild im Kontaktkopiergerät aufeinander justiert. Die Abweichung des Bildes von der Maske konnte so direkt festgestellt werden. Wegen der Kantenunschärfe der Abbildung und des begrenzten Auflößungsvermögens des Justiermikroskops konnten Verzeichnungen von unter 0,5 µm nicht mehr festgestellt werden.

9.2. BILDDREHUNG

Die Bildpunktversetzung Δy als Folge der Bilddrehung wurde mit einem Gitter mit ebenfalls 10 µm Gitterkonstanten und 50 x 15 mm^2 Fläche registriert, Hier sind die Gitterstege parallel zur Längsseite des Gitters, die wieder die x- Richtung darstellt, angeordnet.

Da die Bilddrehung bei Umkehr des Magnetfeldes ihr Vorzeichen wechselt, wird zur Messung von Δy eine Doppelbelichtung der Si- Scheiben vorgenommen, wobei die beiden Belichtungen bei jeweils entgegengesetzter Richtung des Magnetfeldes erfolgen.

Wenn keine Verzeichnung vorliegt, überlagern sich die beiden Belichtungen zu einem gleichmäßigen Gitter. Bei Auftreten einer Bilddrehung entstehen Moirée- Linien, bei denen ein Übergang von hell nach dunkel oder umgekehrt gerade einer gegenseitigen Versetzung der Gitter um eine halbe Gitterkonstante entspricht.

Die Versetzung des einzelnen Gitters, also die Verzeichnung, beträgt aber gerade die Hälfte dieses Wertes, da durch die Umkehr des Magnetfeldes zwischen den beiden überlagerten Aufnahmen die Auswirkung der Bilddrehung verdoppelt wird.

Damit kann eine seitliche Versetzung eines Bildbereichs als Folge der Bilddrehung noch mit einer Genauigkeit von 2,5 µm als Moirée- Muster abgelesen werden.

Eine genauere Auswertung ist mit Hilfe eines Lichtmikroskops möglich, wenn die Abstände einander entsprechender Linien der beiden belichteten Bilder vermessen werden. Als

Verschiebung Δy ergibt sich wieder die Hälfte des Abstands zweier zusammengehöriger Linien. Hier konnten noch Versetzungen von $\Delta y = 0{,}25$ µm gemessen werden.

9.3. ERGEBNISSE DER VERZEICHNUNGSMESSUNG

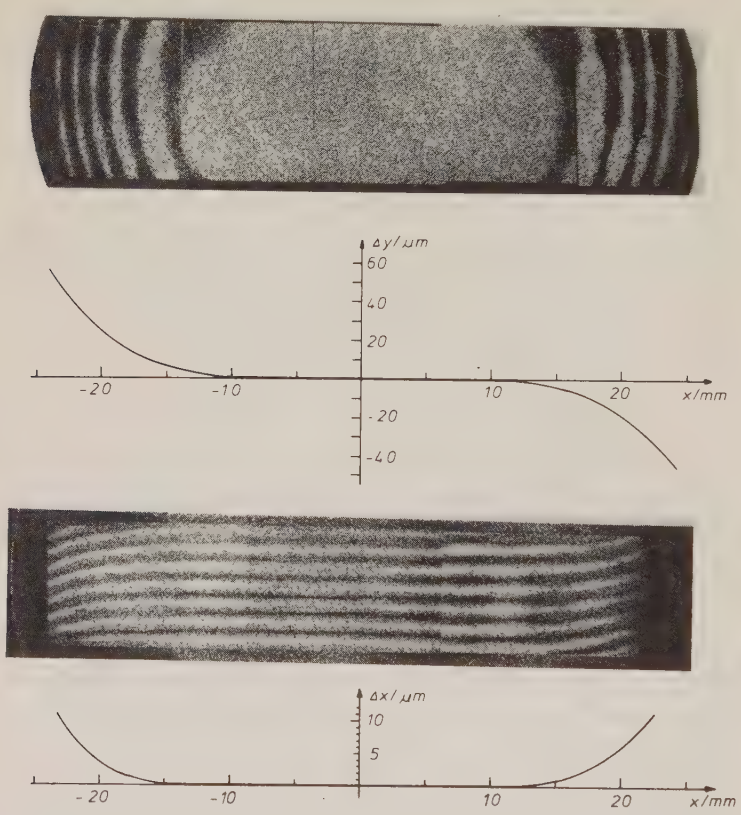


Abb. 20 Verzeichnung des Maskierungsprojektors ohne Korrektur des elektrischen Feldes.

Zwei auf die beschriebene Weise hergestellte Moirée- Muster zeigt Abb. 20. Als Anode wurde eine Messingscheibe mit einer 0.17 mm dicken Auflagelippe für die Wafer verwendet. Diese Stufe am Bildrand bewirkt auch in einem Abstand von 14 mm noch eine messbare Verzeichnung. In einem Bildfeld

mit 45 mm Durchmesser wird eine Verzeichnung von $\Delta x = 11$ µm und $\Delta y = 40$ µm erreicht.

Ein fehlerfreies Übereinanderbelichten von mehreren Masken, das während des Herstellungsprozesses von Halbleiterbauelementen notwendig ist, kann zwar mit diesem Gerät so auch erfolgen, da diese Verzeichnung reproduzierbar, also auf jeder Aufnahme gleich ist, wenn aber für die einzelnen Masken getrennte Projektoren verwendet werden sollen, muß die Verzeichnung in allen Geräten gleich sein. Eine Verwendung des elektronenoptischen Maskierungsprojektors in Verbindung mit lichtoptischen Kontaktkopiergeräten ist so aber nicht möglich.

9.4. KORREKTUR DER VERZEICHNUNG

Zur Korrektur der Verzeichnung kann eine Zusatzspannung zwischen Anodenring und Wafer angelegt werden, mit der die Potentialstufe an der Auflagelippe ausgeglichen wird. In Abb. 21 ist diese Anordnung des Abbildungssystems dargestellt.

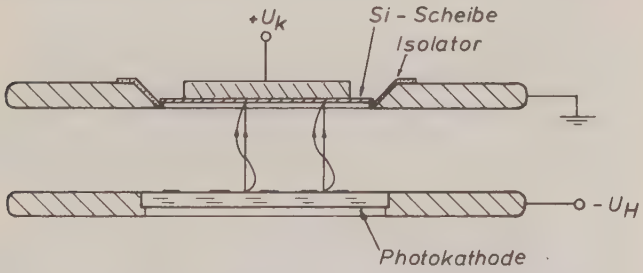


Abb. 21 Abbildungssystem mit Korrekturspannung

Als Isolator zwischen Wafer und Anodenring wurde eine dünn aufgesprühte Schicht aus Plastik- Spray 70 der Firma Kontakt- Chemie verwendet. Die Gesamtdicke der so entstandenen Auflagelippe beträgt 0,34 mm.

Die Verzeichnung ist korrigiert, wenn die Moirée- Muster der Gittermasken durch Anpassen der Korrekturspannung abgeglichen sind. Das Δx- Muster besteht dann aus Geraden, während das Δy- Moirée verschwindet.

Zunächst konnte die Verzeichnung nur bis zu einem Minimum von etwa 3 µm korrigiert werden. Die Ursache für diese restliche Verzeichnung war das noch nicht ausreichend homogene Magnetfeld. Dieser Fehler konnte durch Verändern des Abstands der Korrekturplatten von den Polschuhen ausgeglichen werden.

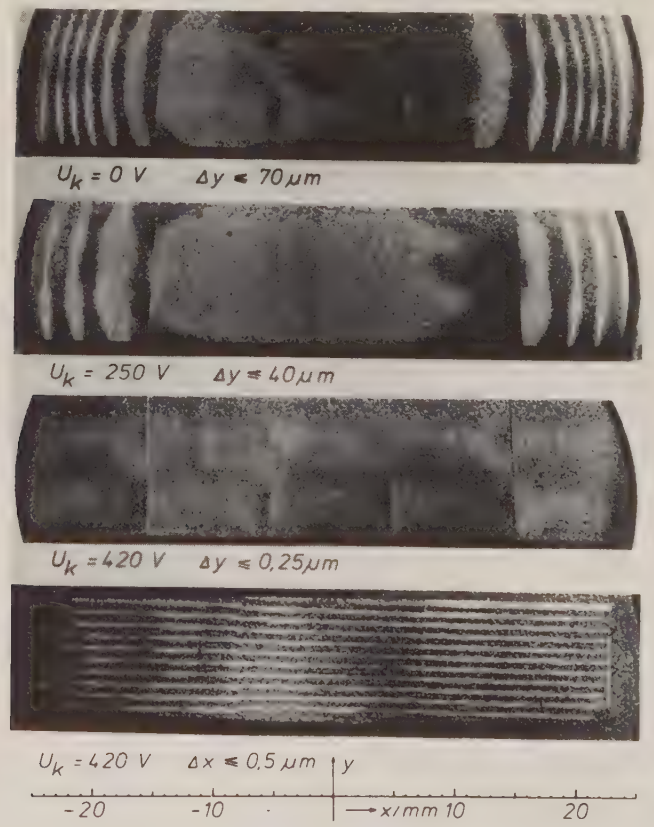


Abb. 22 Einfluß der Korrekturspannung auf die Verzeichnung.

Die bei verschiedenen Korrekturspannungen durch die Bilddrehung entstehenden Moirée- Muster zeigt Abb. 22. Ohne Korrekturspannung beträgt die Versetzung Δy eines Bildpunktes im Abstand von 24 mm von der Bildmitte 70 µm. Bei Anlegen einer Spannung von U_K = 250 V verringert sich Δy an dieser Stelle auf 40 µm. Bei einer Korrekturspannung von 420 V ist kein Moirée- Muster mehr zu sehen. Auch bei den Moirée- Linien der Δx- Richtung ist keine Abweichung feststellbar. Die Beschleunigungsspannung U_H betrug bei diesen Aufnahmen 12 kV.

Die mit der Korrekturspannung U_K = 420 V aufgenommenen Moirée- Muster der Bilddrehung zeigen bei der Vermessung im Mikroskop, daß die Bildpunktversetzung Δy unterhalb der Messgenauigkeit bleibt und somit 0,25 µm nicht übersteigt. Auch in Δx- Richtung konnte mit dem Kontaktkopiergerät keine Abweichung mehr festgestellt werden.

Zwei Beispiele der vermessenen Muster zeigt Abb. 23.

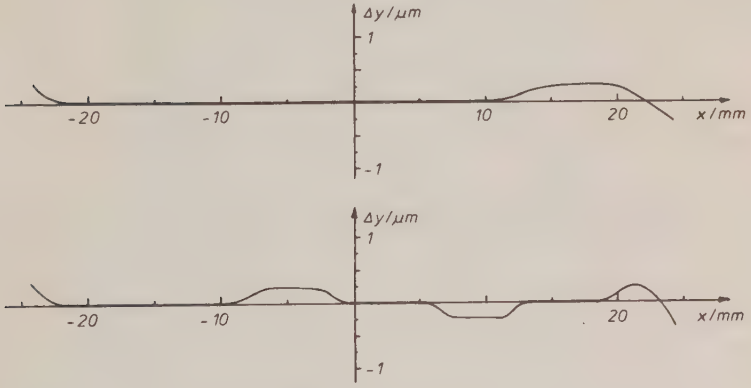


Abb. 23 Verzeichnung des korrigierten Maskierungsprojektors

9.5. WAFERVERZUG

Thermische Prozesse wie Oberflächenoxydationen oder Diffusionen, die zur Herstellung von Halbleiterbauelementen notwendig sind, führen zu Krümmungen der Si- Scheiben, wobei Durchbiegungen von 20 µm und mehr auftreten. Auch durch mechanische Einwirkungen können die nur 0,3 mm dicken Scheiben leicht verbogen werden. Der Kontakt auf der Rückseite der Wafer, der zur Vermeidung von Aufladungen im Gerät aufgelegt wurde, kann auch zu einer Durchbiegung der Wafer führen.

Da das elektrische Feld des Maskierungsprojektors durch die verbogenen Scheiben ebenfalls verändert wird, entstehen wieder verzeichnete Abbildungen.

Nach einer Abschätzung von G. A. Wardley (5,6) beträgt die maximale Versetzung eines Bildpunktes von der Sollstelle auf Grund einer Durchbiegung δ der Wafer etwa 0,1 δ bei Wafern mit 50 mm Durchmesser und einem Abstand von 10 mm zwischen Anode und Kathode. Eine Durchbiegung von 20 µm bewirkt also eine Verzeichnung von etwa 2 µm.

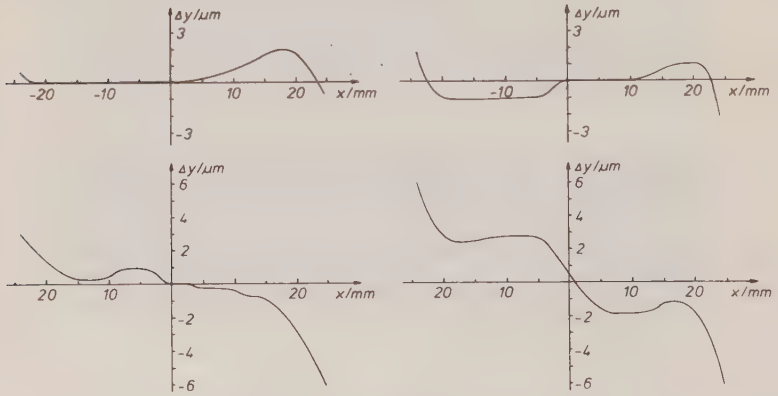


Abb. 24 Verzeichnung bei Verwendung von unebenen Si- Scheiben.

Abb. 24 zeigt vier Beispiele von solchen verzeichneten Aufnahmen. Die Korrekturspannung wurde gleich eingestellt wie bei den in Abb. 23 gezeigten Bildern.

Diese Verzeichnung ist nicht mehr reproduzierbar, da sich die Verformung zum einen nicht bei jeder Scheibe gleich einstellt, und sich zum andern auch bei jedem Prozessschritt ändern kann.

Dieser Effekt macht es notwendig, eine Aufspannvorrichtung für die Wafer zu verwenden, durch die sie immer in derselben Lage gehalten werden. Dafür schlug Wardley (6,7) eine elektrostatische Halterung vor, bei der die Scheiben durch ein elektrisches Feld auf eine ebene Oberfläche gezogen werden. In Abb. 25 ist ein solcher "elektrostatischer Chuck" angegeben.

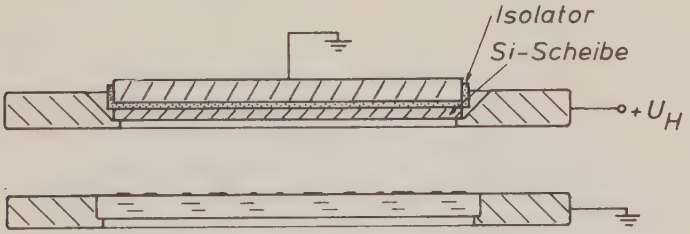


Abb. 25 Elektrostatische Aufspannvorrichtung (Chuck)

Hier ist die Kathode des Abbildungssystems geerdet. Die Beschleunigungsspannung wird an die Anode als positive Hochspannung angelegt. Auf die Rückseite der Si- Scheibe wird eine geerdete Metallscheibe mit einem Isolator aufgelegt. Durch das elektrische Feld zwischen Scheibe und Metallplatte wird die Scheibe an die eben polierte Isolatoroberfläche angepresst. Die Dicke des Isolators hängt von dessen Spannungsfestigkeit und seiner mechanischen Bearbeitbarkeit ab und beträgt etwa 0.2 mm bis 1 mm. Bei einer Spannung von 8 kV und einer Isolatordicke von 1 mm beträgt der elektrostatische Anpressdruck etwa 10^3 Pa.

Untersuchungen von U. Schwab (14) an einem solchen elektrostatischen Chuck ergaben, daß sich auch bei durch thermische Prozesse verbogenen Wafern eine reproduzierbare Oberflächenwelligkeit von unter 2 µm erreichen lässt. Die durch diese Restwelligkeit hervorgerufene Bildverzeichnung bleibt unter 0,2 µm. Damit ist der Maskierungsprojektor auch für eine Anwendung in der 1 µm- Technologie, wie sie von der Halbleiterindustrie angestrebt wird, geeignet.

10. ABBILDUNG DURCH NETZANODE

Um die Abhängigkeit des elektrischen Feldes und damit der Abbildungsbedingungen von der Oberflächenbeschaffenheit der zu maskierenden Wafer zu beseitigen, wurde vorgeschlagen, ein Netz als Anode vor der Bildfläche aufzuspannen. Diese Anordnung zeigt Abb. 26.

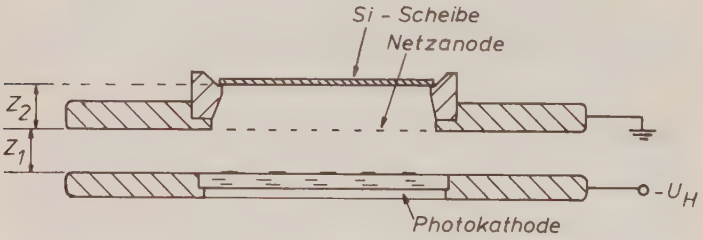


Abb. 26 Abbildungssystem mit Netzanode

Die Abbildungsgleichung für dieses System erhält man zu

$$B = \sqrt{2\pi^2 m/e}\ \sqrt{U_H}\,(Z_1 + Z_2/2)^{-1}$$

Die an den Netzkanten auftreffenden Elektronen werden hier gestreut, so daß die Netzkanten wie Elektronenquellen mit großer Energiebreite wirken. Das Magnetfeld wird nach der Fokusbedingung für die Abbildung der Kathode auf die Si-Scheibe eingestellt, was eine entsprechend unscharfe Abbildung der Netzkanten ergibt. Das Elektronenbündel aus einem Bildpunkt der Kathode ist am Ort des Netzes stark auf-

geweitet, sodaß eine Überlagerung der Maskenabbildung mit der Netzabbildung in einem weiten Bereich um den Bildpunkt erfolgt.

Der Durchmesser des Elektronenbündels am Netz ergibt sich zu

$$D \leq (2/\pi)(2Z_1 + Z_2)\sqrt{U_o/U}\,\sin(\pi(1 + Z_2/2Z_1)^{-1})$$

Die Bündeldurchmesser für die in den Versuchen verwendeten Abmessungen sind in Tab. 1 angegeben.

D/µm	Z_1/mm	Z_2/mm	U_o/V	U_H/kV
44	5	5	0,2	7
28	7	3	0,2	8

Tab. 1 Elektronenbündeldurchmesser am Netz

Abb. 27 und Abb. 28 zeigen den Einfluß der Netzanode auf die Abbildungseigenschaften des Maskierungsprojektors. Das für Abb. 27 und im oberen Teil der Abb. 28 verwendete Netz hatte eine Gitterkonstante von 12,8 µm und eine Stegbreite von 4,7 µm. Eine Störung der Abbildung durch das Netz macht sich vor allem dann bemerkbar, wenn die Maskenabmessungen in der Größenordnung der Netzabmessungen liegen. An den Rändern der belichteten Bereiche erfolgt aber immer eine Verschmierung der Kanten.

Wird das Netz näher an die Si- Scheiben verschoben, verschwindet die Abbildung der Netzkanten, jedoch tritt dann eine deutliche Schattenwirkung auf, was im unteren Teil von Abb. 27 zu sehen ist.

Ein weiterer Versuch wurde mit einem Nickelnetz mit der Gitterkonstanten 5 µm und der Stegbreite 1 µm unternommen, das bei der Firma Siemens angefertigt wurde. Das Ergebnis einer Abbildung durch dieses Netz ist im unteren Teil von Abb. 28 zu sehen. Die Anordnung des Netzes ist dieselbe wie im oberen Teil der Abb. 28 und 27. Hier ist die Netzstruktur nur noch zu sehen, wenn die Bildkanten und die Netzkanten unter einem kleinen Winkel zueinander verlaufen, die durch das Netz verursachte Verschmierung der Belichtungs-

ränder bleibt aber erhalten.

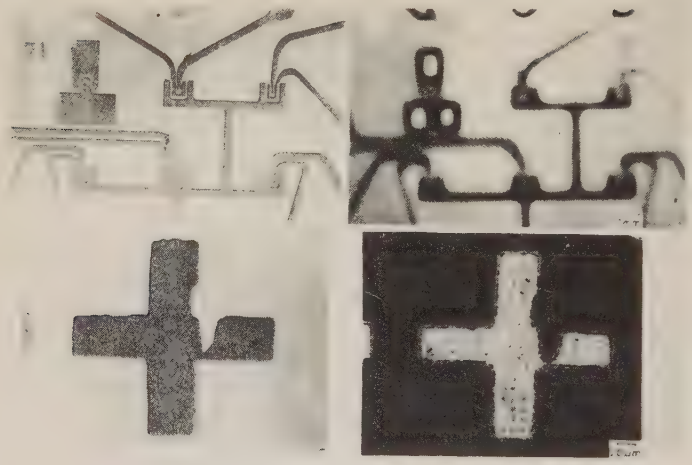


Abb. 27 Einfluß der Netzanordnung; oben: $Z_2:Z_1 = 5:5$
unten: $Z_2:Z_1 = 3:7$

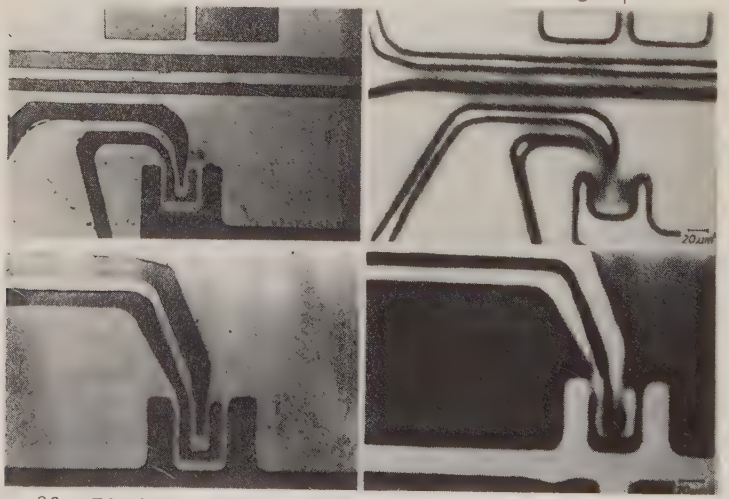


Abb. 28 Einfluß der Netzabmessungen; oben: Gitterkonstante 12,8 µm, unten: Gitterkonstante 5 µm

Die hier gezeigten Ergebnisse der Abbildungseigenschaften einer Netzanode im 1:1- Maskierungsprojektor zeigen, daß die Verwendung eines Netzes keine Vorteile bringt, insbesondere da ja mit dem elektrostatischen Chuck eine Aufspannvorrichtung vorliegt, die die störenden Verbiegungen der Wafer beseitigt.

11. ABLENKUNG DES BILDFELDES

Im Verlauf der Herstellung von Halbleiterbauelementen wird die Si- Scheibe nacheinander mit verschiedenen Masken belichtet, die aufeinander justiert werden müssen. Hierfür werden elektronische Hilfseinrichtungen benötigt, da eine lichtoptische Justierung bei diesem Gerät schlecht möglich ist.

Beim Justiervorgang wird das Bild von Justiermarken auf der Maske über entsprechende Justiermarken auf dem Wafer hin und her bewegt und durch Verschieben der mittleren Bildlage ein symmetrisches Signal erzeugt. Es wurden schon verschiedene Justierverfahren angegeben. Livesey (8) verwendet als Justiermarken Löcher, die in die Wafer geätzt werden und misst den durchtretenden Elektronenstrom, der von den entsprechenden Marken aus der Maske ausgeht.

Scott (9) verwendet ein schon 1971 von B. Fay (19) vorgeschlagenes Verfahren. Dabei wird die unterschiedliche Röntgenstrahlausbeute des Elektronenstromes beim Auftreffen auf das Silizium und Schwermetalljustiermarken als Messwert verwendet.

Dieser Justiervorgang kann am leichtesten erfolgen und automatisiert werden, wenn das auf der Si- Scheibe entstehende Bild der Kathode mit Hilfe von homogenen magnetischen Ablenkfeldern verschoben werden kann. Bei den Projektoren, die eisenfreie Spulen zur Erzeugung des Abbildungsfeldes verwenden, kann mit Helmholtzspulen ein ausreichend homogenes Ablenkfeld erhalten werden.

Ein vollständiges Justiersystem wurde zu dem hier beschriebenen Gerät nicht entwickelt, es wird aber gezeigt,

daß auch bei Verwendung eines Eisenjochmagneten eine Ablenkung des Bildfeldes mittels Magnetspulen möglich ist. Die verwendeten Spulen bestehen aus mit Kupfer beschichteten Epoxydharzplatten von 200 mm Breite, in die 80 gerade Leiterbahnen gefräßt wurden. Die Platten wurden auf der Polschuhoberfläche befestigt und mit der zugehörigen gegenüberliegenden Platte so verbunden, daß einlagige Spulen mit 80 Windungen entstanden. Eine solche Spule ist zwischen den Polschuhen in Abb. 29 zu sehen.

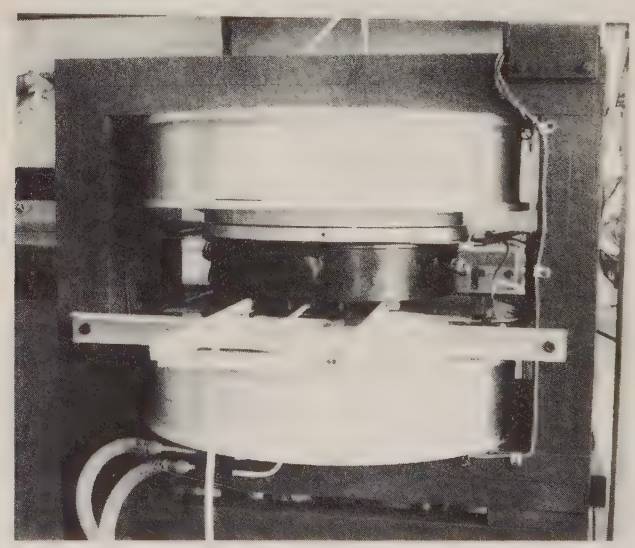


Abb. 29 Polschuhmagnet mit Abbildungsdose und einer Ablenkspule

Die Verschiebung des Bildfeldes durch diese Ablenkspule beträgt 42 µm pro Ampère Spulenstrom. Mit dem vorhandenen Netzgerät konnte damit eine Bildverschiebung von ± 120 µm erreicht werden.

Zur Vermessung der Ablenkung wurden ein nichtabgelenktes und ein abgelenktes Bild auf einen Wafer belichtet und die Abstände entsprechender Marken mit dem Lichtmikroskop ver-

messen. Dabei konnte keine durch die Ablenkung bewirkte Verzeichnung festgestellt werden. Abb. 30 zeigt eine mit Hilfe der Ablenkspule erfolgte Doppelbelichtung.

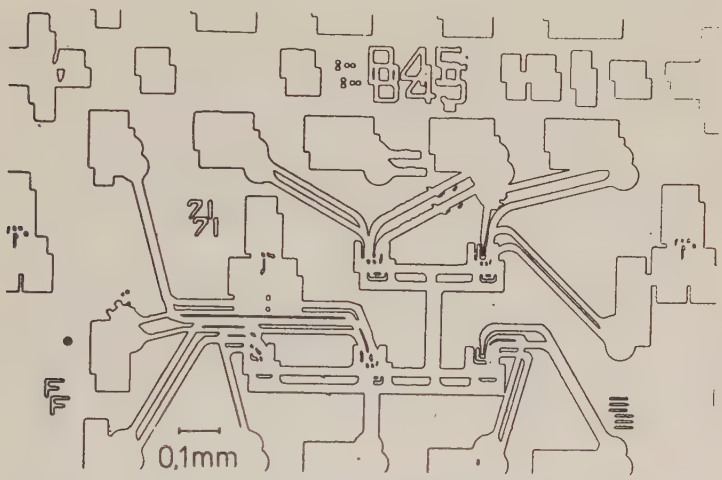


Abb. 30 Bildverschiebung durch Ablenkfeld

12. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Maskierung von Halbleiterscheiben und zur Kopie von Masken wurde ein elektronenoptischer Maskierungsprojektor mit 1:1- Abbildung aufgebaut. Die abzubildende Maske befindet sich als lichtundurchlässiges Muster aus TiO_2 auf einer Quarzglasscheibe und ist mit einer Photoschicht aus Palladium überzogen. Bei Durchleuchtung mit UV- Licht werden aus der Photoschicht an den lichtdurchlässigen Stellen Elektronen ausgelöst, die durch parallele, homogene elektrische und magnetische Felder auf die Oberfläche des zu maskierenden Substrats abgebildet werden.

Das erforderliche Magnetfeld von etwa 900 A/cm wird von einem Eisenjochmagnet mit Polschuhen erzeugt und ist somit sehr unempfindlich gegen äußere Einflüsse. Eine Erweiterung des Abbildungsfeldes von bisher 50 mm Durchmesser ist hier leicht möglich.

Die zu maskierenden Scheiben werden in einen Anodenring auf eine Auflagelippe eingelegt wodurch die Abbildungsbedingungen nicht von der Dicke oder einem keilförmigen Querschnitt des Substrats abhängen. Eine Feldverzerrung an der durch die Lippe entstehenden Stufe kann durch eine zwischen Anodenring und Substrat angelegte Korrekturspannung verhindert werden. Magnetfeld und elektrisches Feld können so homogen eingestellt werden, daß im gesamten Bildfeld von 50 mm Durchmesser die Verzeichnung kleiner als 0,25 µm bleibt.

Eine Justiereinrichtung zur Herstellung von deckungsgleichen Mehrfachbelichtungen wurde nicht eingebaut, es wird aber gezeigt, daß auch bei diesem Gerät eine Verschiebung des Maskenbildes auf der Substratoberfläche mit Hilfe von zwischen den Polschuhen eingebauten Ablenkspulen möglich ist. Eine durch die Ablenkung bedingte Verzeichnung konnte bei Verschiebungen von bis zu ±120 µm nicht festgestellt werden.

Wenn der Maskierungsprojektor bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen eingesetzt werden soll, wird eine

Justiereinrichtung notwendig, zur Herstellung von Einzelmaskierungen wie Kopie der Arbeitsmasken und Übertragung von Ätzmasken auf elektrisch leitende Oberflächen kann der Projektor auch ohne Justierhilfen eingesetzt werden.

Wie die mit dem Gerät gemachten Abbildungen zeigen, können Maskierungen mit Abmessungen bis herunter zu 2 µm direkt erfolgen. Bei Abmessungen von unter 2 µm müssen die durch rückgestreute Elektronen hervorgerufenen Veränderungen der Bildabmessungen bei der Herstellung der Maske berücksichtigt werden. Die Belichtungsdosis muß dann ebenfalls den Maskenabmessungen angepasst werden. Bei Berücksichtigung dieser Bedingungen können aber Strukturen mit unter 0,5 µm Abmessungen erhalten werden.

Als elektronenempfindliche Beschichtung des Substrats wird PMMA (Polymethylmethacrylat) verwendet, das bei diesem Gerät in Schichtdicken von über 1,5 µm eingesetzt werden kann. Je nach Dicke der PMMA- Schicht beträgt die Belichtungszeit 20 bis 40 Sekunden.

Daten des Maskierungsprojektors

Elektrische Feldstärke	12 kV/cm
Magnetfeldstärke	910 A/cm
Leistungsaufnahme des Magneten	200 Watt
Bildfelddurchmesser	50 mm
Auflösungsvermögen	< 0,5 µm
Verzeichnung	⩽ 0,25 µm
Belichtungszeit	⩽ 40 sec

Bei Prof. Dr. R. Speidel bedanke ich mich sehr herzlich für die Anregung und hilfreiche Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. G. Möllenstedt danke ich für sein förderliches Interesse.

Herrn Dr. Kilger danke ich für die Mithilfe bei der Herstellung des Testmusters.

Den technischen Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Physik sei für die präzise Ausführung der Arbeiten gedankt.

Weiterhin möchte ich der Firma IBM, Sindelfingen für die Überlassung von Arbeitsmasken und der Firma Siemens, München für die Herstellung des Netzes danken.

13. LITERATURVERZEICHNIS

1) T.W.O'Keeffe, J.Vine, R.M.Handy; Solid State Electronics 23, 841, (1969)

2) J.P.Scott; IEEE Transactions on Electron Devices, ED-22, 409, (1975)

3) J.P.Scott; Proc. 6th Int. Conf. Electron and Ion Beams, May 1974, p. 123

4) W.R.Livesey, R.B.Fritz; IEEE Transactions on Electron Devices ED-19, 647, (1972)

5) G.A.Wardley; IEEE Transactions on Electron Devices ED-22, 414, (1975)

6) G.A.Wardley; J. Vac. Sci. Technol. 12, 1313, (1975)

7) G.A.Wardley; Rev. Sci. Instrum. 44, 1506, (1973)

8) W.R.Livesey; J. Vac. Sci. Technol. 15, 1022, (1978)

9) J.P.Scott; J. Vac. Sci. Technol. 15, 1016, (1978)

10) B.Fay; 3rd Int. Colloq. A. V. DRM 71, Versailles, France, Sept. 1971

11) T.H.P.Chang; J. Vac. Sci. Technol. 12, 1271, (1975)

12) J.Greschner; Dissertation, Inst. für Angew. Physik, Tübingen, (1974)

13) F.Martin; Diplomarbeit, Inst. für Angew. Physik Tübingen, (1973)

14) U.Schwab; Diplomarbeit, Inst. für Angew. Physik, Tübingen, (1980)

ANHANG

Berechnungen zum Abbildungssystem

Die nachfolgend aufgeführten Berechnungen sollen als Hilfsmittel zum Verständnis der Abbildungsbedingungen des Maskierungsprojektors dienen. Ausführlichere Berechnungen befinden sich in den Arbeiten von O'Keeffe (1), Wardley (5,6) und in meiner Diplomarbeit.

A1. ABBILDUNGSGLEICHUNGEN

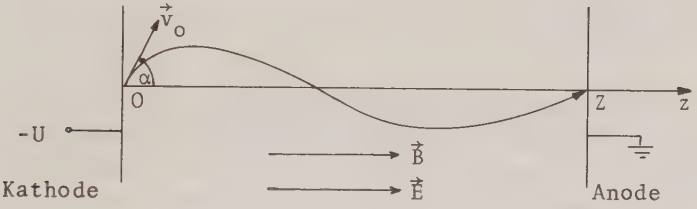


Abb. A1 Elektronenbahn in den Abbildungsfeldern

Die Kräfte, die auf die an der Photokathode ausgelösten Elektronen wirken, lassen sich durch Gleichung (1) angeben.

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}) + e\vec{E} \qquad (1)$$

Da die elektrischen und magnetischen Felder parallel in Richtung der z- Achse verlaufen, lauten die Komponenten in Richtung der Einheitsvektoren

$$F_x = ev_yB \qquad (2)$$

$$F_y = -ev_xB \qquad (3)$$

$$F_z = eE \qquad (4)$$

Die Elektronen verlassen die Kathode mit der Anfangsgeschwindigkeit v_o im Winkelbereich $\alpha = \pm 90^o$ um die z- Achse. Das Gleichungssystem führt damit für die z- Richtung, in der nur das elektrische Feld wirksam wird, zu der Momentangeschwindigkeit

$$v_z = \frac{e}{m} Et + v_o \cos\alpha \qquad (5)$$

und dem Ort

$$z = \frac{e}{2m} Et^2 + (v_o \cos\alpha)t \qquad (6)$$

In der x- y- Ebene ergibt sich als Bewegung im Magnetfeld eine Kreisbahn mit dem Umlaufwinkel

$$\beta = \frac{eB}{m} t \qquad (7)$$

der Umlaufszeit

$$\tau = \frac{2\pi m}{eB} \qquad (8)$$

und dem Bahnradius

$$R = \frac{m}{eB} v_o \sin\alpha \qquad (9)$$

Die Überlagerung aus beiden Bewegungen ergibt Spiralbahnen in z- Richtung. Eine Fokussierung des Systems kann erreicht werden, wenn die Elektronen zwischen Kathode und Anode gerade einen Umlauf im Magnetfeld durchführen.

Für $t = \tau$ erhält man dann aus den Gleichungen (5) und (8) die Geschwindigkeit v_A, mit der die Elektronen auf die Anode auftreffen zu

$$v_A = 2\pi \frac{E}{B} + v_o \cos\alpha$$

Aus den Gleichungen (6) und (8) folgt für die Brennpunktlage

$$Z = 2\pi^2 \frac{mE}{eB^2} + 2\pi \frac{m}{eB} v_o \cos\alpha$$

Da die Brennweite Z von der Komponente v_{oz} der Anfangsgeschwindigkeit in Richtung der z- Achse abhängt, lässt sich eine exakte Fokussierung nur für Elektronen mit gleicher z- Komponente der Anfangsgeschwindigkeit erreichen. Wird die Brennweite für die Elektronen eingestellt, die mit der Anfangsgeschwindigkeit $v_{oz} = 0$ an der Kathode ausgelöst werden, vereinfachen sich die Abbildungsgleichungen. Die Auftreffgeschwindigkeit der Elektronen auf die Anode ist dann

$$v_A = 2\pi \frac{E}{B} \qquad (10)$$

und die Brennpunktslage

$$Z = 2\pi^2 \frac{mE}{eB^2} \qquad (11)$$

Elektronen, die mit einer anderen Anfangsgeschwindigkeit ausgelöst wurden, führen dann zu einem Abbildungsfehler. Die Größe des Fehlerscheibchens lässt sich aus der Apertur des Elektronenbündels im Brennpunkt und der durch die Geschwindigkeitskomponente v_{oz} bedingten Brennpunktverschiebung berechnen. Der Durchmesser ΔD des Bildfehlerscheibchens ist

$$\Delta D \leqslant 2Z\frac{U_o}{U}$$

wobei U_o die der Anfangsgeschwindigkeit v_o entsprechende Spannung ist.

A2. REICHWEITE DER REFLEKTIERTEN ELEKTRONEN

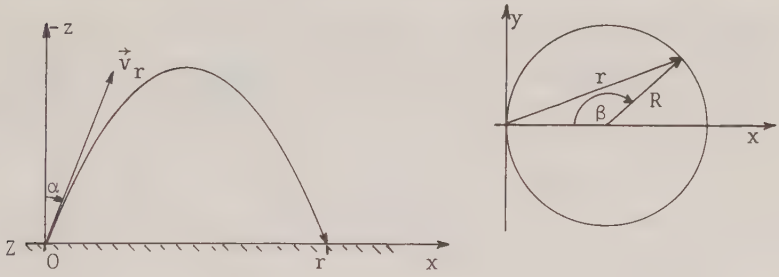


Abb. A2 Bahnen der reflektierten Elektronen
links: Bewegung im elektrischen Feld (x-z- Ebene)
rechts: Bewegung im Magnetfeld (x-y- Ebene)

Die Reichweite der rückgestreuten Elektronen in den elektrischen und magnetischen Feldern zwischen Anode und Kathode hängt ab von ihrer Geschwindigkeit v_r und dem Austrittswinkel α. Die Bewegungsgleichungen ergeben sich entsprechend denen der an der Kathode ausgelösten Elektronen mit dem Unterschied, daß die Anfangsgeschwindigkeit v_r gegen das elektrische Feld gerichtet ist, und die Elektronen am Ort Z starten. Für die Bewegung im elektrischen Feld folgt daher

$$z = \frac{e}{2m} Et^2 - (v_r \cos\alpha)t + Z \qquad (12)$$

Die Zeit t_r, die vergeht bis die Elektronen wieder auf die Anode auftreffen, also bis sie wieder am Ort z = Z sind, erhält man aus Gleichung (12) zu

$$t_r = \frac{2m}{eE} v_r \cos\alpha \qquad (13)$$

Der Abstand des Auftreffpunktes vom Ausgangsort ergibt sich aus der Bewegung im Magnetfeld und der Beziehung (Abb. A2)

$$r = 2R\sin\frac{\beta}{2}$$

mit den Gleichungen (7) und (9)

$$r = \frac{2m}{eB}(v_r \sin\alpha)\sin\left(\frac{eB}{2m} t\right) \qquad (14)$$

und mit Gleichung (13) für $t = t_r$

$$r = \frac{2m}{eB}(v_r \sin\alpha)\sin\left(\frac{B}{E} v_r \cos\alpha\right) \qquad (15)$$

Magnetfeld B und elektrisches Feld E sind durch die Abbildungsgleichungen (10) und (11) festgelegt. Der Radius r, innerhalb dem eine Belichtung durch reflektierte Elektronen erfolgt, ist damit

$$r = \frac{2Z}{\pi} \cdot \frac{v_r}{v_A} (\sin\alpha)\sin\left(2\pi \frac{v_r}{v_A} \cos\alpha\right) \qquad (16)$$

A3. ABBILDUNG MIT NETZANODE

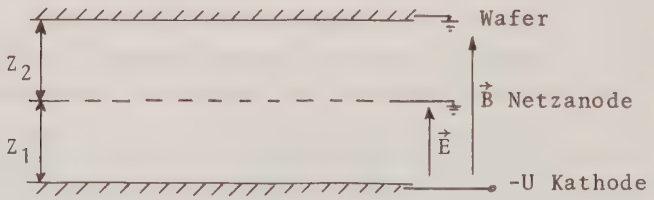


Abb. A3 Abbildungssystem mit Netzanode

Bei der Berechnung der Abbildungsgleichungen für das System mit Netzanode wird wieder angenommen, daß die Brennweite für die Elektronen eingestellt wird, die mit der Anfangsgeschwindigkeit $v_{oz} = 0$ an der Kathode ausgelöst wurden.

Die Flugzeit der Elektronen von der Kathode zum Wafer setzt sich zusammen aus der Zeit t_1, in der die Elektronen im elektrischen Feld beschleunigt werden, und der Zeit t_2, in der sie mit der am Netz erreichten Geschwindigkeit v_n zwischen Netz und Wafer nur unter Einwirkung des Magnetfeldes weiterfliegen.

Die Zeit t_1 folgt aus der Bewegungsgleichung im elektrischen Feld (6) (mit $v_o \cos\alpha = 0$).

$$t_1 = \sqrt{2m/eU}\ Z_1 \qquad (17)$$

Die am Netz erreichte Geschwindigkeit v_n ist nach Gleichung (5) (wieder $v_o \cos\alpha = 0$)

$$v_n = \frac{e}{m} E t_1 = \sqrt{2eU/m} \qquad (18)$$

Die Flugzeit $t_2 = Z_2/v_n$ vom Netz zum Wafer beträgt damit

$$t_2 = \sqrt{2m/eU}\ \frac{Z_2}{2} \qquad (19)$$

Aus der Fokusbedingung Umlaufzeit τ im Magnetfeld gleich Gesamtflugzeit $t_1 + t_2$ folgt damit

$$\frac{2\pi m}{eB} = \sqrt{2m/eU}\ (Z_1 + \frac{Z_2}{2}) \qquad (20)$$

und daraus die zur Fokussierung notwendige Magnetfeldstärke

$$B = \sqrt{2\pi^2 m/e}\sqrt{U}(Z_1 + \frac{Z_2}{2})^{-1}$$

A3.1. DURCHMESSER DES ELEKTRONENBÜNDELS AM NETZ

Der Bündelradius der Elektronen am Netz ergibt sich aus der Bewegung im Magnetfeld wie in Anhang A2, Gleichung (14) zur Zeit $t = t_1$ und mit der der Anfangsgeschwindigkeit v_o entsprechenden Spannung U_o der ausgelösten Elektronen zu

$$r = \frac{2}{B}\sqrt{2m/e}\sqrt{U_o}(\sin\alpha)\sin\left(\frac{B}{\sqrt{U}}\sqrt{e/2m}\ Z_1\right)$$

Mit der Fokusbedingung (20) ist der maximale Bündeldurchmesser am Netz, der für den Winkel $\alpha = 90^o$ erreicht wird

$$D = \frac{2}{\pi}(2Z_1 + Z_2)\sqrt{U_o/U}\ \sin\left(\pi(1 + \frac{Z_2}{2Z_1})^{-1}\right)$$

LEBENSLAUF

29. 3. 1946	Geburt in Leonberg Vater: Paul Martin, Pfarrer in Münklingen † 1949 Mutter: Elvira Martin, geb. Koch
Seit 1951	Wohnort Tübingen
1953 bis 1957	Besuch der Mörike- Volksschule in Tübingen
1957 bis 1966	Besuch des Kepler- Gymnasiums in Tübingen mit dem Abschluß des Zeugnisses der Reife.
1965	Prüfung zum Organisten und Chorleiter in nebenamtlichen Stellen
1966	Beginn des Studiums der Physik an der Eberhard-Karls-Universität in Tübingen. Während der ersten Semester Nebentätigkeit in der Forschungsstelle für Bio-Akustik der MPG/Prof. Faber
1969	Diplom-Vorprüfung
1971 bis 1973	Diplomarbeit über "Elektronenoptische Projektionsmaskierung" am Institut für Angewandte Physik unter Anleitung von Prof. Dr. R. Speidel.
1973	Diplom-Hauptprüfung
Seit 1974	Arbeit an der vorliegenden Dissertation am Institut für Angewandte Physik unter Leitung von Prof. Dr. R. Speidel.

Meine Hochschulausbildung verdanke ich den Herren Professoren und Dozenten
Auwärter, Baumann, Braunbeck, Bues, Dachs, Gaukler, Jönsson, Krüger, Lenz, Mack, Mitter, Möllenstedt, Mühleisen, E.Müller, Rüdorff, Schief, Sommer, Speidel, Stumpf, Wieland, Wildermuth, Wittern, A.Wolf, Zeller.

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (07472) 22145